

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Численное моделирование потоков в водородных шнекоцентробежных насосах турбонасосных агрегатов ЖРД**

Электронные методические указания

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)»  
Соглашение № 2/11 от 03 июня 2013 г.

САМАРА  
2013

УДК СГАУ: 621.438.001.2

Ч-67

Составители: **Сулинов Александр Васильевич,**  
**Шаблий Леонид Сергеевич,**  
**Зубанов Василий Михайлович.**

Рецензент: д-р техн. наук, проф. **С.В. Фалалеев.**

**Численное моделирование потоков в водородных шнекоцентробежных насосах турбонасосных агрегатов ЖРД** [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост.: А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, В.М. Зубанов. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,6 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В методических указаниях описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов шнекоцентробежных насосов турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей, использующих в качестве горючего жидкий водород: построение геометрической модели, наложение расчётной сетки, создание расчётной модели, её решение и анализ результатов. Приведены методы включения в расчёт зависимости плотности жидкой фазы водорода от давления и температуры.

Методические указания предназначены для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302 «Ракетные двигатели» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Моделирование рабочих процессов РД» в 6 семестре, для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Моделирование потоков в лопаточных машинах» в 7 семестре, для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Исследование рабочего процесса ракетных двигателей и энергетических установок» в А-семестре.

Разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## Содержание

Введение.....	4
1 Создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части насоса .....	6
1.1 Исходные данные.....	6
1.2 Формирование общей системы координат .....	10
1.3 Создание геометрической модели шнека .....	11
1.4 Создание геометрической модели рабочего колеса .....	18
1.5 Создание геометрической модели сборной улитки.....	19
1.6 Создание геометрической модели входного патрубка.....	28
2 Создание сеточной модели проточной части насоса .....	30
2.1 Создание сеточных моделей в TurboGrid .....	31
2.2 Создание сеточных моделей в Meshing .....	33
3 Создание расчётной модели насоса.....	38
4 Поиск решения.....	44
5 Анализ результатов .....	47
6 Моделирование с учетом переменных свойств жидкого водорода .....	58
6.1 Задание зависимостей параметров в виде явных функций.....	62
6.2 Задание зависимостей параметров в табличном виде .....	65
6.3 Рекомендации по решению задач с зависимостью параметров.....	67
Библиографический список.....	69

## Введение

Применение водорода в качестве рабочего тела ЖРД позволяет увеличить энергетические возможности средств выведения, тем самым увеличить полезную нагрузку, выводимую на космическую орбиту. Кроме того, в настоящее время вопросы экологии приобретают первостепенное значение, поэтому все более остро ставятся задачи перехода к использованию экологически чистых компонентов ракетных топлив. Все это повышает актуальность работ по созданию ЖРД, использующих водород в качестве рабочего тела.

Одним из основных агрегатов, определяющих характеристики и надежность ЖРД, является турбонасосный агрегат (его иногда называют «сердцем» двигателя), состоящий из насосов, перекачивающих компоненты топлива, и из приводящей (или приводящих) их во вращение турбины (турбин).

О важности и сложности проблемы обеспечения надежной и устойчивой работы ТНА свидетельствует мировая статистика, согласно которой причиной около 70% аварий при отработке двигателя является ТНА [1].

По своим характеристикам и параметрам ТНА последних разработок, находясь на предельно высоком уровне, имеют высокую степень надежности, большой ресурс. Стоящие перед разработчиками ракетной техники задачи дальнейшего значительного повышения ресурса двигателей и многократности их использования выводят на первый план гидродинамическое совершенствование проточных трактов насосов и турбин, направленное на выравнивание полей скоростей и давлений, поиск новых оптимальных конструктивных решений, повышение качества изготовления и использования новых материалов, повышение эффективности средств измерения параметров во время работы и методов диагностики состояния материальной части ТНА [1].

Работы по ТНА являются узким местом по времени на всех этапах создания ЖРД – при проектировании, изготовлении первых образцов, автономных доводочных испытаниях, доводочных испытаниях в составе двигателя, при серийном изготовлении и т.п. От того, насколько тщательно выполнены все проектные работы по ТНА, насколько правильно построена методика его отработки, в

значительной степени зависят надежность двигателя, возможность сокращения сроков каждого из этапов работ и в конечном счете сроки создания двигателя.

Применение компьютерных технологий при создании ТНА и его элементов позволяет не только автоматизировать процесс разработки, но и повысить качество проектируемых изделий, существенно сократить сроки их создания и привести к снижению затрат на весь жизненный цикл.

Одним из перспективных компьютерных средств исследования рабочего процесса элементов ТНА, в частности гидродинамики его насосов, является использование CFD-пакета ANSYS CFX – пакета вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD).

Ранее в учебной литературе [2-4] было рассмотрено CFD-моделирование рабочих процессов автономных и предкамерных осевых турбин, а также шнекоцентробежных насосов «обычных» (с постоянной плотностью при изменении давления) компонентов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX.

В настоящих методических указаниях приведены рекомендации для практического освоения CFD-пакета ANSYS CFX на примере моделирования потока в водородном шнекоцентробежном насосе турбонасосных агрегатов ЖРД и учета переменности его теплофизических свойств (прежде всего, плотности) при изменении давления.

Процесс моделирования потока в водородном шнекоцентробежном насосе состоит из пяти основных этапов: создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части насоса; создание сеточной модели проточной части насоса на базе геометрической модели; создание расчётной модели из сеточной путём наложения условий моделирования исследуемых процессов; поиск решения и анализ результатов моделирования.

Далее каждый этап в методических указаниях описан подробно.

# 1 Создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части насоса

## 1.1 Исходные данные

Для CAD-моделирования насоса необходимы исходные данные, отражающие полную геометрическую форму проточной части, которые были получены в результате проектного расчёта водородного шнекоцентробежного насоса на базе методики, представленной в [5]. На рисунках 1.1-1.4 показаны геометрические параметры проточной части исследуемого насоса: на рисунке 1.1 - схема проточной части насоса в меридиональном сечении, а на рисунке 1.2 - схема спирального сборника с коническим диффузором.

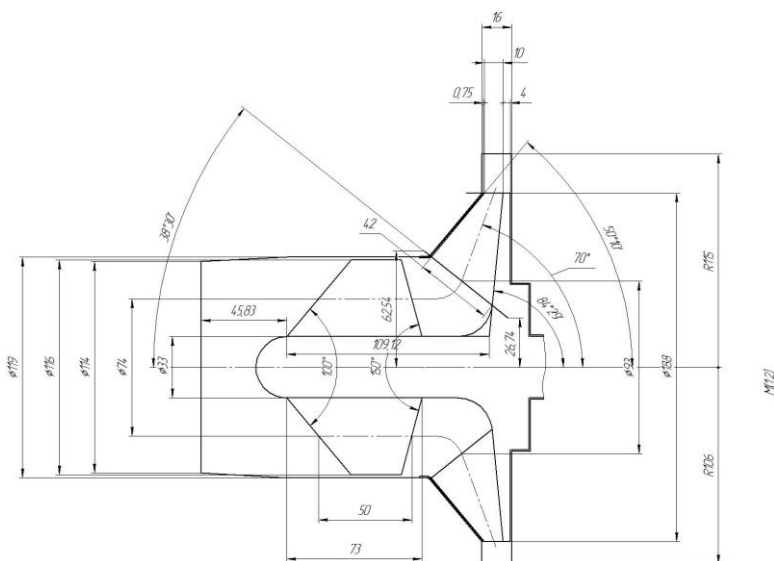


Рисунок 1.1 - Схема проточной части насоса в меридиональной плоскости

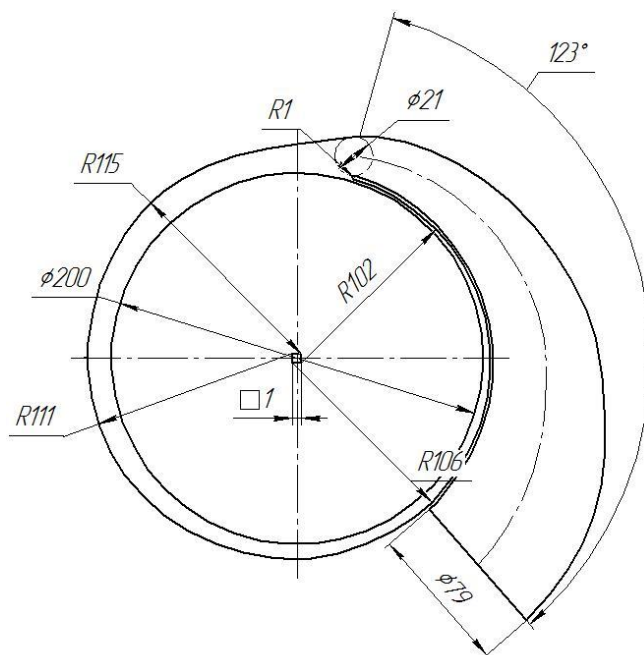


Рисунок 1.2 - Схема спирального сборника с коническим диффузором в окружной плоскости

В таблицах 1.1-1.4 приведены основные геометрические параметры исследуемого насоса.

Таблица 1.1 - Геометрические параметры насоса

Параметр	Размерность	Значение параметра	Параметр	Размерность	Значение параметра
$D_{вх}$	мм	116	$\Theta_2$	град	150
$D'_{ш}$	мм	119	$D_{1ш}$	мм	93
$d_{в}$	мм	33	$b_1$	мм	42
$d_{в.г}$	мм	33	$D_2$	мм	188
$D_{ш}$	мм	116	$b_2$	мм	10
$D_{ср}$	мм	74	$\Delta$	мм	0,75
$l_{ш.ср}$	мм	50	$\Delta'$	мм	4
$l_{ш.в.г}$	мм	73	$\delta_0$	мм	0,2
$\Theta_1$	град	100	$b_3$	мм	16

Таблица 1.2 – Параметры спирального сборника и конического диффузора (см. рисунок 1.2)

Параметр	Размерность	Значение	Параметр	Размерность	Значение
$D_3$	мм	200	$R_3$	мм	111
$a_r$	мм	21	$R_4$	мм	115
$K_r$	-	0,8	$D_{вых}$	мм	79
$a$	мм	4,3	$l_{гд}$	мм	219
$R_1$	мм	102	$\alpha_{ЭКД}$	град	15
$R_2$	мм	106	$r$	мм	1

Таблица 1.3 – Параметры рабочих лопаток центробежного колеса (см. рисунок 1.3)

Параметр	Размерность	Значение параметра	Параметр	Размерность	Значение параметра
$D'_{1ш}$	мм	99	$R_{срРК}$	мм	103
$D'_2$	мм	201	$R_{вот}$	мм	101
$Z_{РК}$	-	10	$R_{вып}$	мм	105
$\Theta_{РК}$	град	36	$C_m$	мм	4
$\beta_{1ш}$	град	13	$r_1$	мм	2
$\beta_{2ш}$	град	32	$r_2$	мм	2

Таблица 1.4 – Параметры решетки шнека постоянного шага колеса (см. рисунок 1.4).

Параметр	Размерность	Значение параметра	Параметр	Размерность	Значение параметра
$D_{ср.ш}$	мм	74	$b_{ср}$	мм	257
$Z_{ш}$	-	2	$b'_{ср}$	мм	103
$S_{ср}$	мм	45	$b''_{ср}$	мм	64
$(b/t)_{ср}$		2,2	$\bar{C}_m = \frac{C_m}{b_{ср}}$	-	0,01
$\beta_{1ш} = \beta_{2ш}$	град	11	$C_m$	мм	2,57
$l_{ср.ш}$	мм	50	$r_1$	мм	0,9
$t_{ср.ш}$	мм	117	$r_2$	мм	0,9



Создание геометрических моделей шнека и крыльчатки выполняется в системе CAD-моделирования ANSYS BladeGen, встроенной в систему ANSYS Workbench, а создание улитки проточной части – в программе NX 7.5.

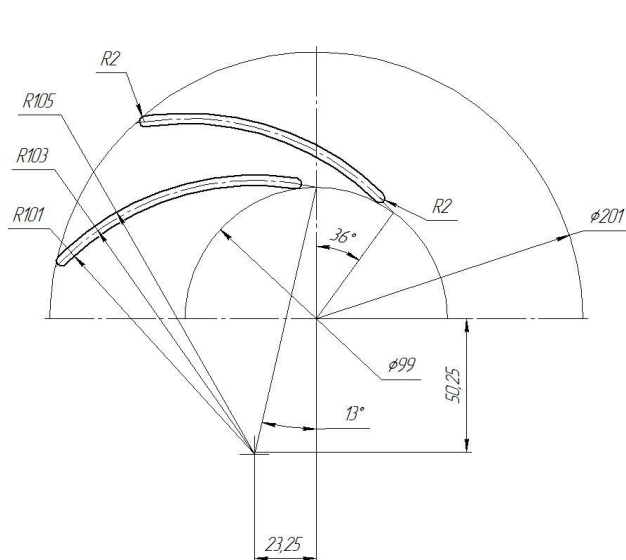


Рисунок 1.3 - Схема профилей лопаток центробежного РК

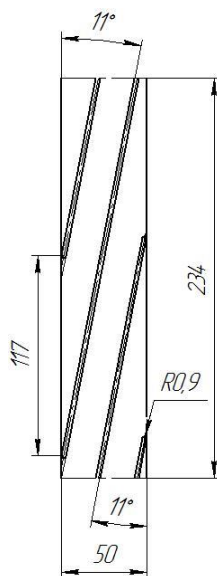


Рисунок 1.4 - Схема  
решетки шнека  
постоянного шага

## 1.2 Формирование общей системы координат

В общем случае отдельные части насоса могут формироваться в разных системах трёхмерного моделирования. При этом, чтобы в результате соединения всех элементов получилась цельная модель необходимо, чтобы отдельные элементы были смещены друг относительно друга на определенные расстояния, т.е. были правильно позиционированы в глобальной системе координат.

Однако, как правило, геометрические размеры отдельных элементов (шнека, лопаток, спирального сборника) удобнее представлять на чертежах в локальных размерах.

Перед построением чертежей таких моделей можно использовать сдвиг системы координат, переставляя её на место локальной, а затем после выполнения локального чертежа, возвращая её глобальное положение - на оси вращения ротора насоса. На рисунке 1.5 показан пример задания локальной системы координат (ЛКС) в программе КОМПАС-3D.

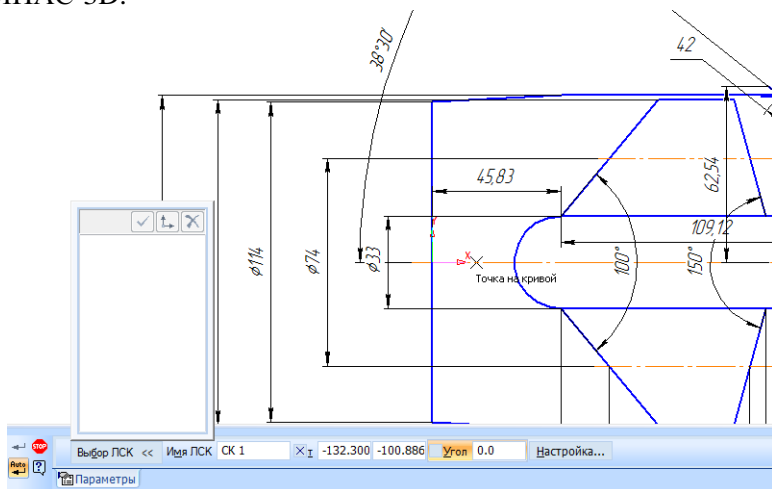


Рисунок 1.5 – Задание системы координат

Перед началом трехмерного моделирования положение глобальной системы координат должно быть неизменным, а все размеры и расстояния должны отмеряться от неё. Желательно заранее определить эти размеры, например, используя меню *Измерения 2D*,

далее *Координаты точки* (рисунок 1.7). Крайне важным также является выбор оси вращения при моделировании. По умолчанию в ANSYS CFX используется ось Z, а положительное направление вращения определяется по правилу правого буравчика.

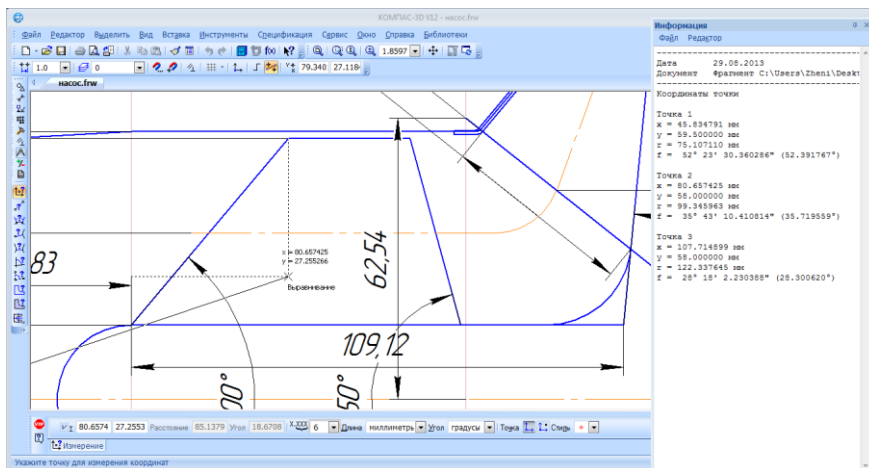


Рисунок 1.7 – Определение координат точек в созданной ЛСК

### 1.3 Создание геометрической модели шнека

**Шаг 1.** Запустить ANSYS Workbench из меню программ:

Пуск -> Программы -> ANSYS 14.5 -> Workbench

**Шаг 2.** Добавить в пустой проект Workbench систему построения геометрии лопаточных венцов *BladeGen* из раскрывающегося подменю *Component Systems*, вытянув её на белое поле проекта из левого списка (рисунок 1.8).

**Шаг 3.** Запустить систему построения лопаточных венцов, дважды щелкнув на блоке *Blade Design* (см. рисунок 1.8).

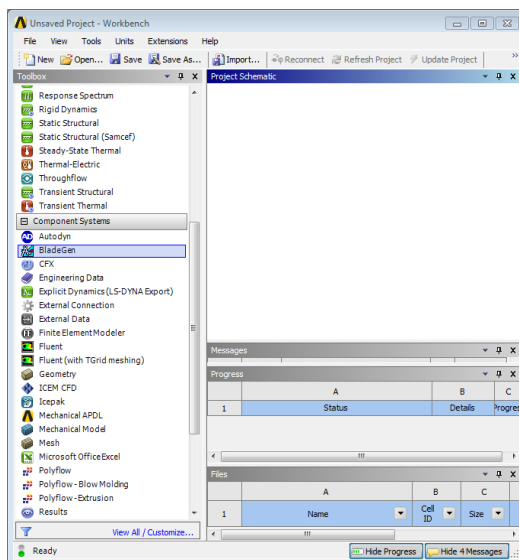


Рисунок 1.8 – Окно ANSYS Workbench при запуске и элемент системы построения лопаточных венцов BladeGen

**Шаг 4.** Создать новый файл BladeGen (рисунок 1.9). В появившемся окне выберите вкладку *Normal Axial*, режим - *Angle/Thickness* (угол/толщина) и задайте значения меридиональных координат межлопаточного канала, записанные ранее (см. раздел 1.2) Далее выбрать вариант задания параметров по углу и толщине *Ang/Thk* (рисунок 1.10) и нажать *OK*.

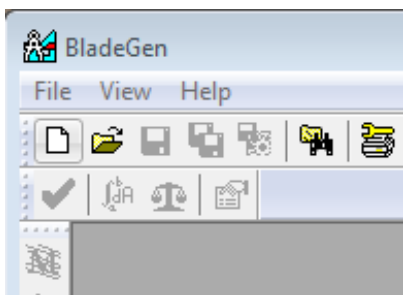


Рисунок 1.9 – Создание нового файла и выбор

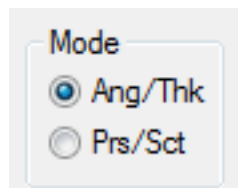


Рисунок 1.10 – Выбор режима задания геометрии венца: угол/толщина (*Angle/Thickness*) или профиль (*Prs/Sct*)

Затем в новом окне нужно задать толщину и угол закрутки шнека, количество лопаток (количество заходов шнека) (# Blades), количество слоев для задания угла (Angle) и толщины (Thickness) и количество слоев для вывода результатов (Out) (рисунок 1.11). Если геометрические свойства лопатки (шнека) не изменяются по высоте, то для задания параметров можно использовать по одному слою (Ang: 1, Thk: 1). Для вывода лучше использовать пять слоёв по умолчанию (Out: 5).

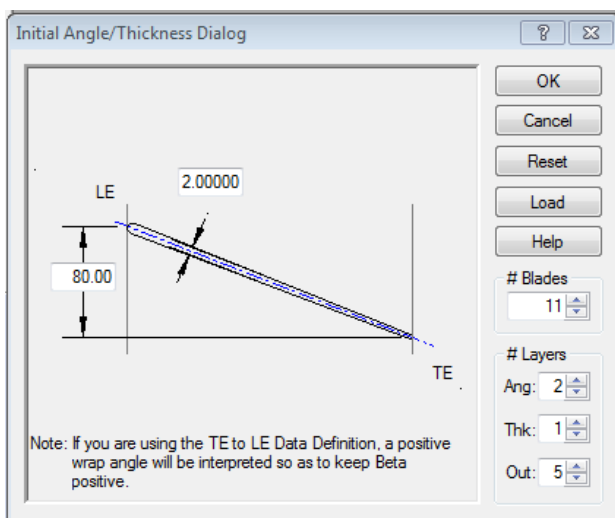


Рисунок 1.11 – задание параметров шнека

Толщина шнека на первом этапе задаётся постоянной (на рисунке 1.11 значение 2,0), в дальнейшем распределение толщины может быть задано. Закрутка шнека - это угол поворота его входной кромки относительно выходной (на рисунке 1.11 значение 80.0). Иными словами это угол, на который должен повернуться ротор при «навивке» на него шнека. Поскольку, как правило, шнек навит более, чем на один оборот, этот угол может составлять более 360 градусов.

**Шаг 5.** Далее задаются координаты профиля шнека. Щелкаем дважды по точке профиля и задаем координаты *Horizontal* и *Vertical* (соответственно *x* и *y* из записанных ранее) (рисунок 1.12).

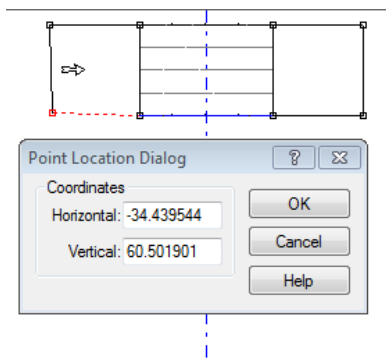


Рисунок 1.12 – Задание координат меридионального сечения

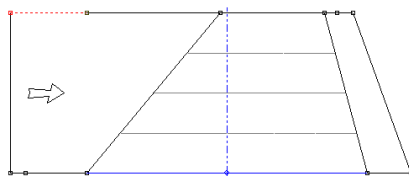


Рисунок 1.13 - Меридиональное сечение шнека после завершения процедуры образмеривания

После задания координат всех точек меридиональное сечение примет необходимую форму (рисунок 1.13). В случае, если необходимо задать дополнительные точки (разбить отрезок) или заменить отрезки прямых дугами или кривыми Безье, это осуществляется через контекстное меню. Необходимая прямая выбирается левым кликом мыши, и далее через вызванное правым кликом контекстное меню выбирается соответствующая операция: конвертации (Convert to -> Bezier, Spline, Arc), разбиения и т.п.

**Шаг 6.** Задание распределения лопаточного угла (Beta) и угла закрутки (Theta) шнека по длине канала осуществляется на левом двойном графике в нижней части экрана. Переключение между режимами осуществляется через контекстное меню (рисунок 1.12): Beta Definition для задания лопаточного угла Beta, Theta Definition для задания угла закрутки Theta. Для работы с точками графиков используются те же приёмы, как и при задании точек меридионального сечения (см. шаг. 5). Если шнек постоянного шага, то его лопаточные углы не изменяются от входа к выходу. Соответственно, график распределения Beta по ходу проточной части является горизонтальной прямой и перед перемещением точек целесообразно конвертировать график в прямую (Convert to -> Bezier -> и указать количество точек - две). Следует помнить, что в программе BladeGen угол Beta измеряется не от фронта, как это принято в ТРЛМ, а от оси вращения.

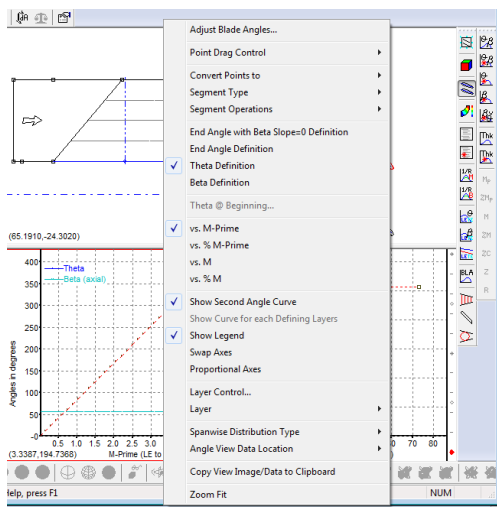



Рисунок 1.12 – Переключение между режимами Beta Definition и Theta Definition

**Шаг 7.** Задание распределения толщины шнека по длине канала осуществляется на правом графике в нижней части экрана. Если шнек постоянной толщины, то график распределения Thickness по ходу проточной части также является горизонтальной прямой.

**Шаг 8.** Для задания скругления лопаток на входе и на выходе нужно нажать на кнопку  *Blade Properties* (Свойства лопатки) в левом меню и выбрать вкладку *LE/TE Elipse* (рисунок 1.13) - эллиптические входные и выходные кромки. У каждой кромки указывается соотношение большого и малого диаметров эллипса. При Elliptic Ratio равном единице кромка является круглой.

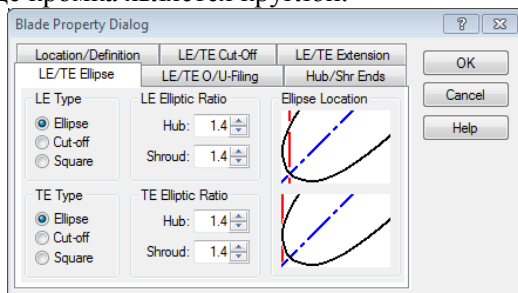




Рисунок 1.13 – Задание параметров входной (LE) и выходной (TE) кромок

**Шаг 9.** Если есть необходимость изменить количество заходов шнека (если на шаге 4 они были заданы неверно), это можно сделать, нажав кнопку  *Blade Count*.

**Шаг 10.** Посмотреть построенную модель в 3D можно, нажав кнопку  *3D View* из правого меню. Варианты отображения картинки можно изменять кнопками левой части нижнего меню (рисунок 1.14).

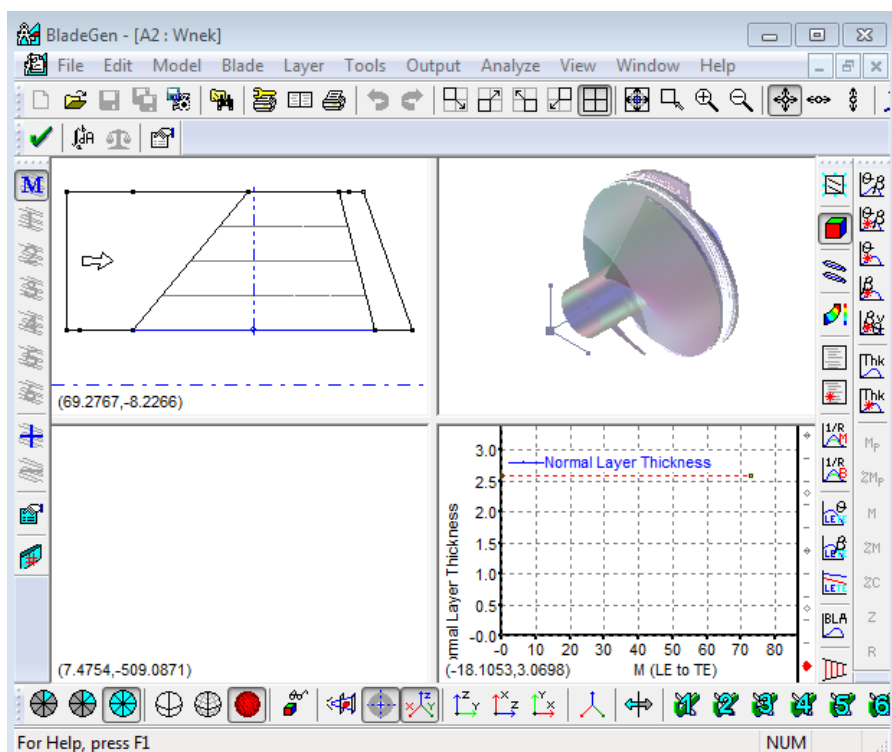



Рисунок 1.14 – Окно программы BladeGen с построенной моделью шнека



**Шаг 11.** Перед окончанием работы с BladeGen необходимо задать параметры модели, используя меню  Model Properties (рисунок 1.15). В нём обязательным для задания является только поле Model Units, в котором нужно указать единицы измерения, использованные при построении геометрии (mm, m, ...), другие поля являются лишь справочными.

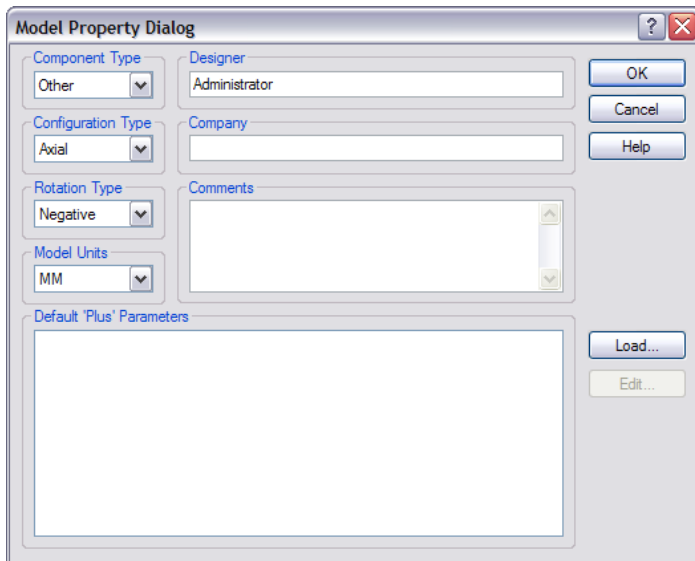


Рисунок 1.15 – Окно Model Properties программы BladeGen

## 1.4 Создание геометрической модели рабочего колеса

Для построения модели рабочего колеса необходимо повторить шаги 2-11 раздела 1.2, за исключением того, что на шаге 4 при создании нового файла необходимо выбрать вкладку Radial Impeller (рисунок 1.16).

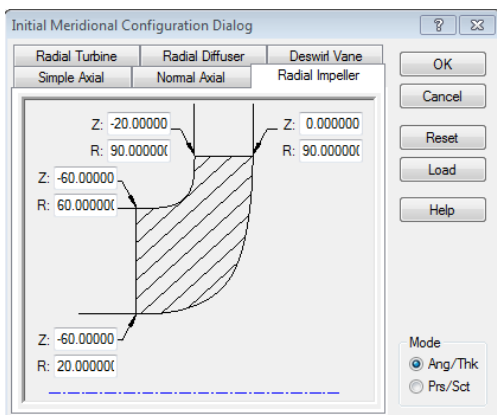


Рисунок 1.16 – Вкладка Radial Impeller программы BladeGen

Полученная геометрическую модель крыльчатки представлена на рисунке 1.17. Важно, чтобы направление лопаток шнека и рабочего колеса было согласовано. В случае, если необходимо изменить направление лопаток того или другого венца, это делается в BladeGen командой главного меню Tools -> Reverse Rotation Direction.

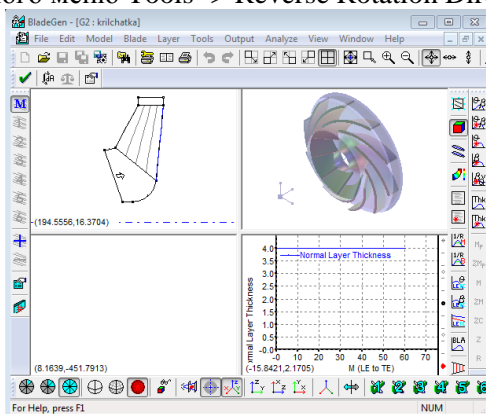


Рисунок 1.17 – Построенная модель рабочего колеса в окне программы BladeGen

## 1.5 Создание геометрической модели сборной улитки

Проектирование спирального сборника - сложная задача, поскольку форма канала сильно изменяется при движении вдоль проточной части. Для выявления формы спирального сборника недостаточно только схемы в окружной плоскости (см. рисунок 1.2), ведь форма сечения канала при движении по спирали может изменяться (рисунок 1.18), превращаясь из практически прямоугольной в полукруглую, а затем - в круглую. Тем не менее, для проведения моделирования обязательно необходима полная 3D-модель, поэтому необходимо выполнять моделирование, дополняя «белые места» геометрической формы канала имеющимися данными известных прототипов.

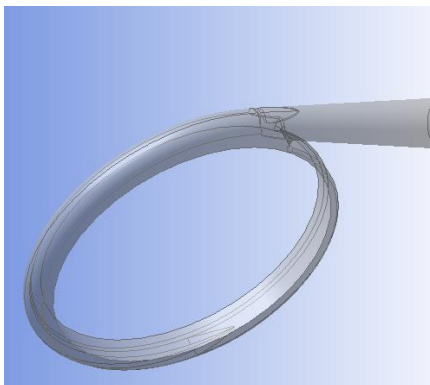


Рисунок 1.18 – Форма спирального сборника (сборной улитки)

Геометрическая модель проточной части сборной улитки является сложной пространственной фигурой. Её построение потенциально можно выполнить в любой системе трёхмерного моделирования [3], однако высокая сложность математического представления геометрии может вызвать ошибки в работе некоторых CAD-систем. В этом отношении более выгодными представляются «тяжелые» профессиональные пакеты CAD-моделирования, такие как NX, ProE, SolidWorks, CATIA. В данном пособии рассмотрен пример построения сборной улитки в программе NX версии 7.5.

**Шаг 12.** Запустить NX 7.5 из меню программ:

Пуск -> Программы -> UGS NX 7.5 -> NX 7.5

Создать новую модель. Не забыть указать имя модели и путь к нему так, чтобы имя и путь содержали только латиницу.

**Шаг 13.** При построении модели нужно выбрать плоскость построения XY, учитывая, что модели шнека и крыльчатки, полученные в программе BladeGen, имеют ось вращения z.

**Шаг 14.** В плоскости XY построить контур профиля улитки и начертить прямые для будущих сечений (рисунок 1.19). Для примера начерчены линии через угловой промежуток  $15^{\circ}$ . Также построить касательные к контуру профиля улитки в местах пересечения с построенными прямыми (см. рисунок 1.19).

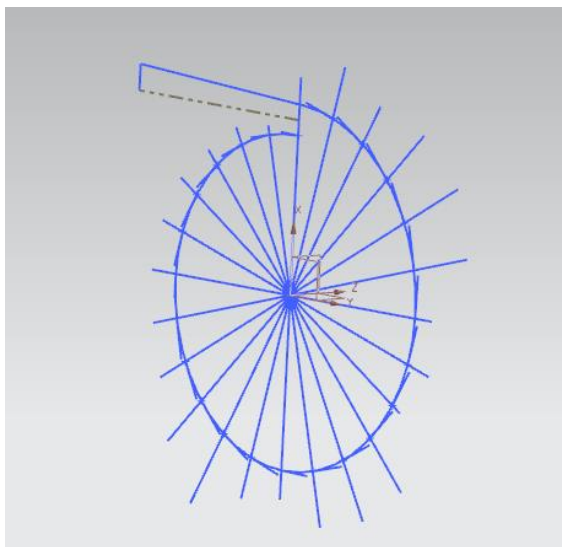


Рисунок 1.19 – Вспомогательные линии для построения спирального сборника

Далее на каждом луче необходимо построить эскиз соответствующего сечения. Каждый эскиз строится следующим образом.

**Шаг 15.** Выбирается тип сечения On Plane, метод построения плоскости для сечения Create Plane. Плоскость создается по методу On Curve (рисунок 1.20). Кроме этого необходимо задать точку локальной системы координат для сечения (Specify Point).

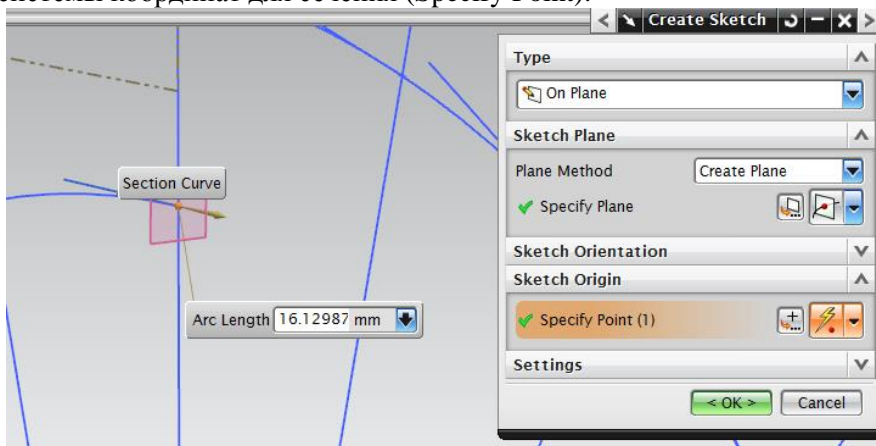


Рисунок 1.20 – Создание базовой плоскости эскиза

**Шаг 16.** В созданной базовой плоскости строится соответствующее замкнутое сечение сборной улитки (рисунок 1.21). При этом наиболее важны линии, внешних обводов улитки, а линии, соответствующие поверхности соединения с выходом из рабочего колеса можно искусственно сместить к центру.

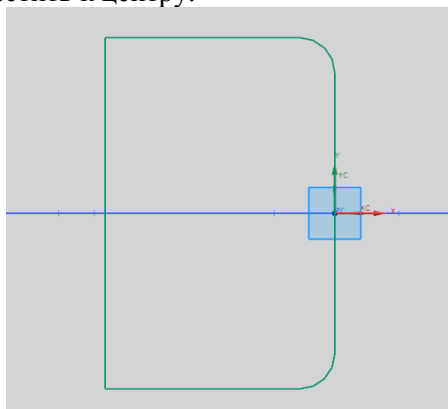


Рисунок 1.21 – Создание сечения

Таким образом, многократным повторением шагов 15-16 создаются все необходимые сечения (рисунок 1.22).

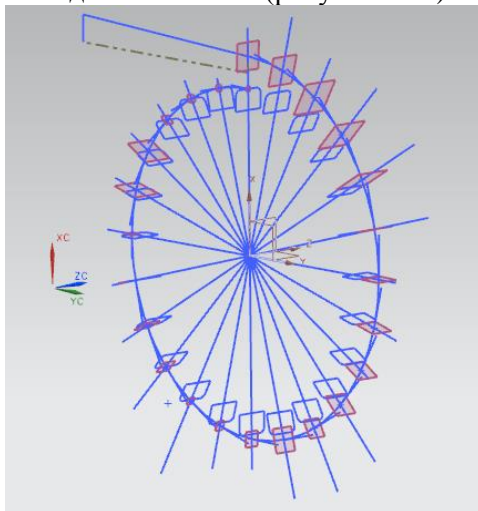


Рисунок 1.22 – Полный набор сечений спирального сборника

**Шаг 17.** Для соединения сечений используется операция View→Mesh Surface→Through Curves (рисунок 1.23).

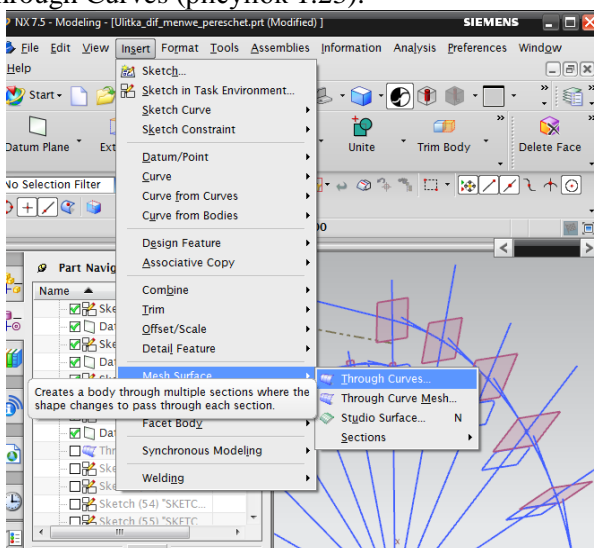


Рисунок 1.23 – Создание операции соединения сечений поверхностями

**Шаг 18.** Сечения необходимо выбирать по порядку, обязательно обводя в каждом сечении замкнутый контур в порядке, одинаковом для всех сечений. После выбора всех линий одного сечения необходимо нажать на кнопку Add New Set (рисунок 1.24) и приступить к следующему сечению. Результатом выполнения данной операции является фигура, показанная на рисунке 1.25.

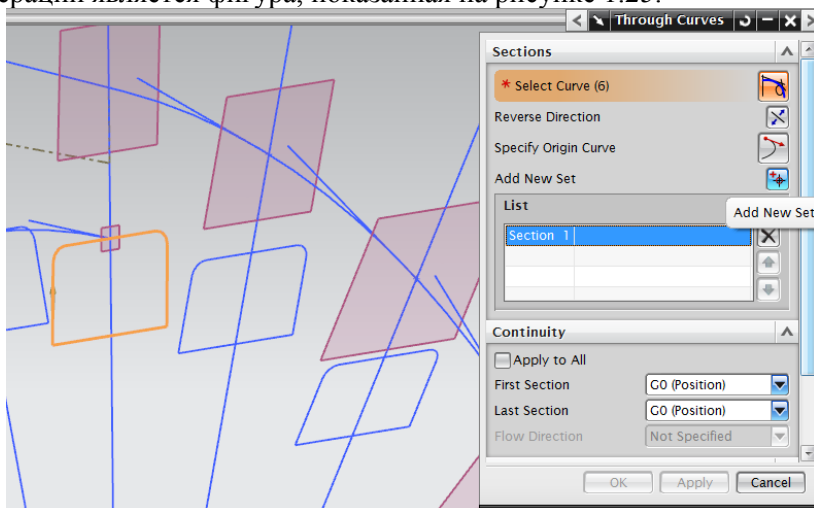


Рисунок 1.24 – Процесс выбора сечений

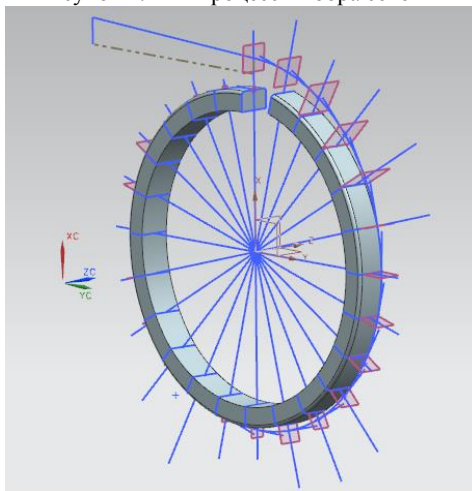


Рисунок 1.25 – Результат объединения сечений прямоугольной части улитки

Ввиду сложности геометрии канала, выполнить операцию объединения реальных сечений, как правило, не удаётся. Поэтому построение обычно идёт в несколько этапов: послойно. То есть, повторяя шаги 16-18, выполняя построение сечений для следующего слоя (рисунок 1.26) и производя «натягивание» на них поверхностей (рисунок 1.27) несколько раз, можно добиться желаемой формы внешних обводов сборной улитки. При этом нет необходимости следить за корректностью внутренней поверхности соединения улитки и рабочего колеса. Дело в том, что выполнить одновременное корректное построение обеих поверхностей удаётся редко. Поэтому предпочтение отдаётся внешним обводам, а внутренние «калибруются» на заключительном этапе дополнительной булевой операцией.

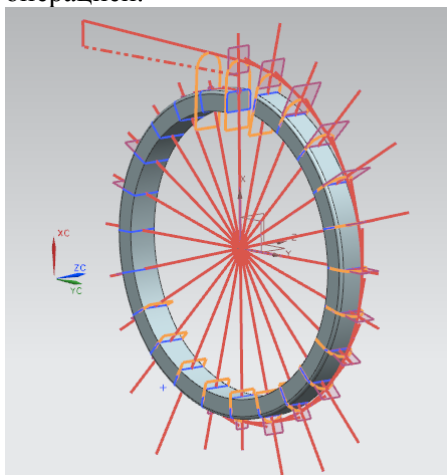


Рисунок 1.26 – Добавление набора сечений

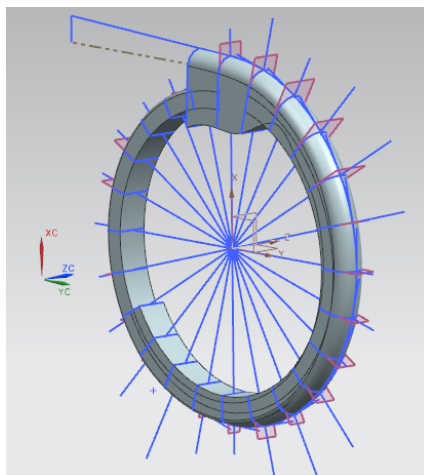


Рисунок 1.27 – Фигура, натянутая на добавленные сечения

**Шаг 19.** Строится конический диффузор. Для упрощения построения эскиза может быть использована операция Offset Curve, смещающая элемент имеющегося контура улитки (рисунок 1.28). Если контур улитки ещё не был построен, можно выполнить построение сечения стандартными операциями эскизирования.



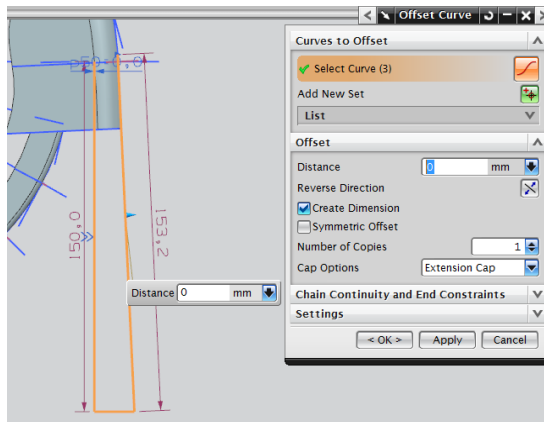


Рисунок 1.28 – Операция Offset Curve

**Шаг 20.** Операция Revolve сечения диффузора (рисунок 1.29).

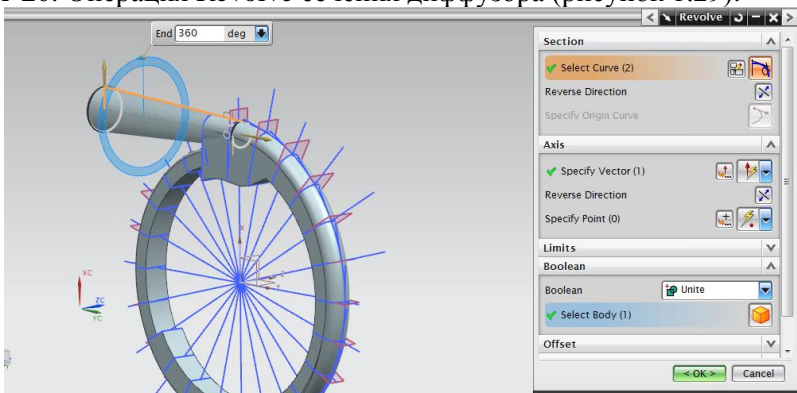
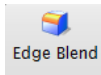


Рисунок 1.29 – Операция Revolve

**Шаг 21.** Выполнить операцию объединения (Unite) для всех полученных тел, если они не были объединены ранее.

**Шаг 22.** Выполнить скругление необходимых поверхностей



операцией . Особое внимание следует уделить области горла улитки (рисунок 1.30), так как именно в этом месте возникает большинство проблем при CFD-расчёте улитки.

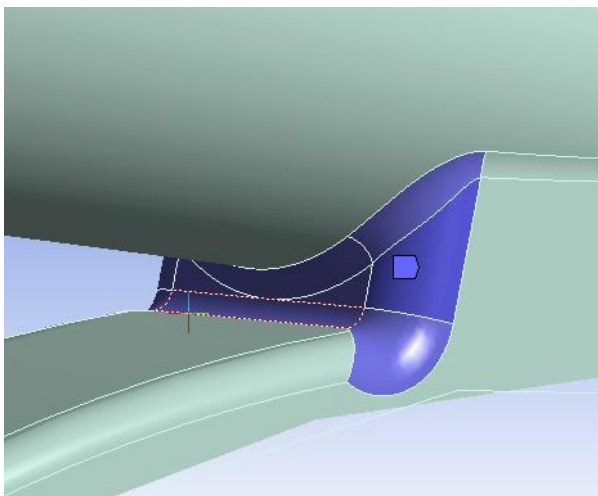


Рисунок 1.30 – Скругленные поверхности в области горла улитки

**Шаг 23.** Выполняем калибровку области сопряжения улитки с рабочим колесом. Для этого создаём и вычитаем из модели цилиндр с диаметром выхода из рабочего колеса (рисунок 1.31).

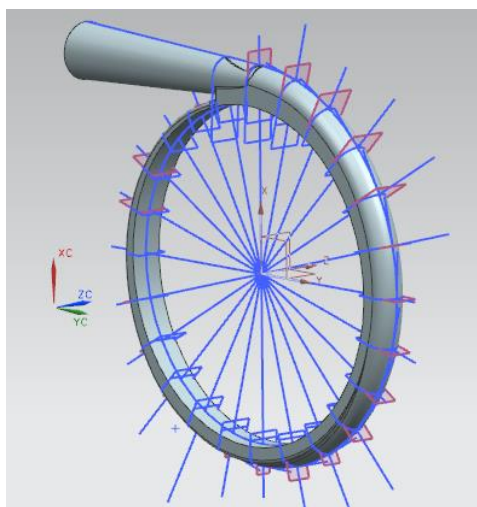


Рисунок 1.31 – Модель с откалиброванной областью сопряжения с рабочим колесом

Построенную таким образом модель необходимо экспортировать в ANSYS, например через формат Parasolid.

**Шаг 24.** В NX 7.5 сохраняем модель в Parasolid с расширением «.x\_t».  
File→Export→Parasolid... (рисунок 1.32)

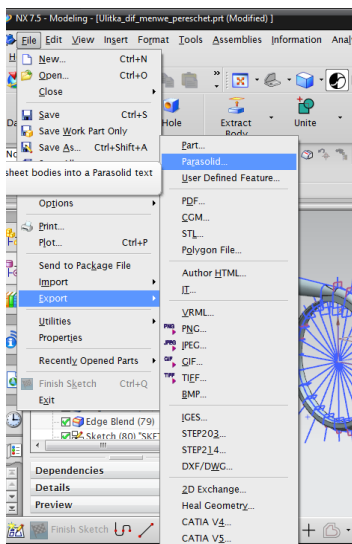


Рисунок 1.32 – Экспорт модели в Parasolid

**Шаг 25.** В проекте Workbench добавить из левого меню компонент Meshing (рисунок 1.33).

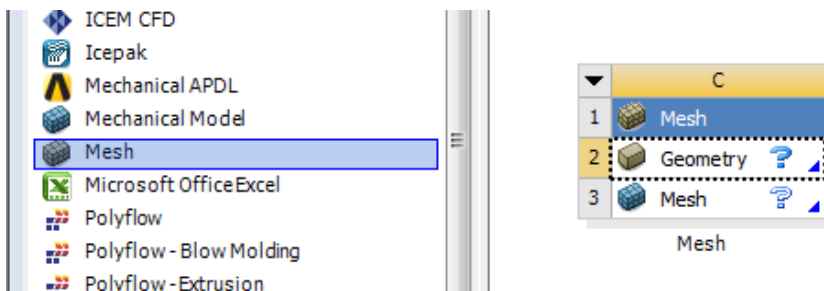


Рисунок 1.33 – Компонент Meshing на поле проекта Workbench

**Шаг 26.** Запустить систему построения модели DesignModeler, дважды щелкнув Geometry.

**Шаг 27.** В появившемся окне указать единицы измерения – миллиметры (рисунок 1.34).

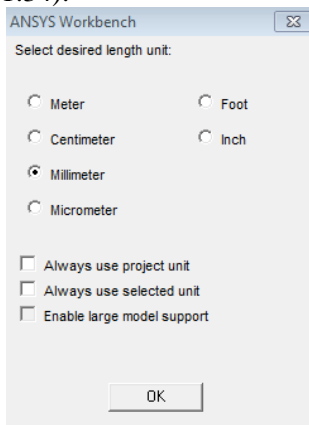


Рисунок 1.34 – Окно выбора единиц измерения DesignModeler

**Шаг 28.** Выполнить импорт модели крыльчатки (см. рисунок 1.18), используя команду главного меню File→Import External Geometry File.

## 1.6 Создание геометрической модели входного патрубка

Моделирование течения в насосе будет более наглядным, если начинать геометрическое представление насоса не от входа в шнек, а от начала входного трубопровода. При этом, во-первых, на входе в насос удобнее задавать параметры (они задаются в неподвижной системе координат), а во-вторых, дополнительно моделируются процессы поворота потока и обтекания вала, загромождающего часть канала на входе в шнек, что повышает точность и наглядность моделирования.

**Шаг 29.** Выполнить построение проточной части на входе в насос в системе CAD-моделирования (рисунок 1.35). Экспортировать геометрию в универсальный формат.

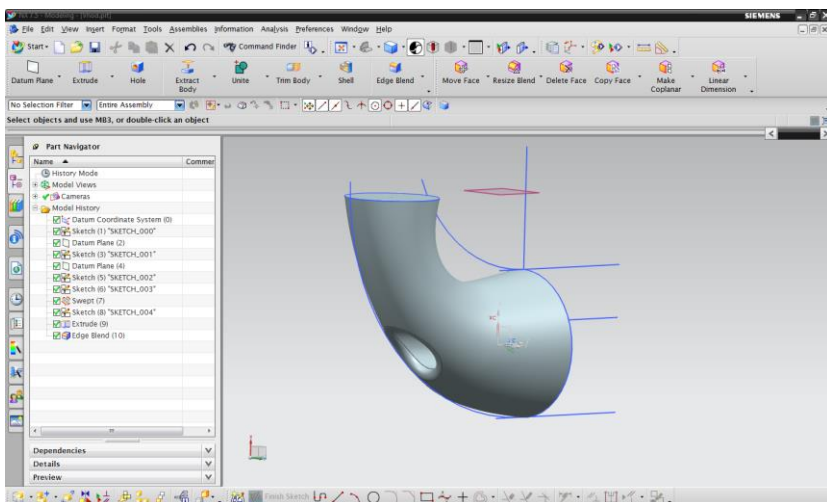


Рисунок 1.35 – Построение геометрической модели входа в программе NX 7.5

**Шаг 30.** Выполнить импорт геометрии в ANSYS DesignModeler, используя команду главного меню File→Import External Geometry File (рисунок 1.36).

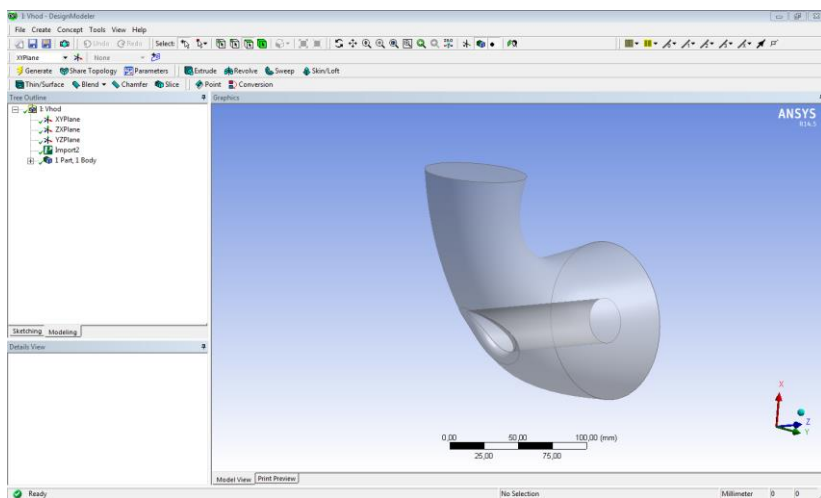


Рисунок 1.36 – Импорт геометрической модели входа в программе DesignModeler

## 2 Создание сеточной модели проточной части насоса

Созданные в предыдущем разделе элементы геометрии насоса можно разделить на лопаточные (шнек, крыльчатка) и общие (спиральный сборник, входная область). Для лопаточных элементов в ANSYS имеется специализированный сеткогенератор TurboGrid, для остальных - универсальный Meshing. После построения сетки на всех элементах, они собираются в один расчёт, при этом проект Workbench выглядит, как показано на рисунке 2.1.

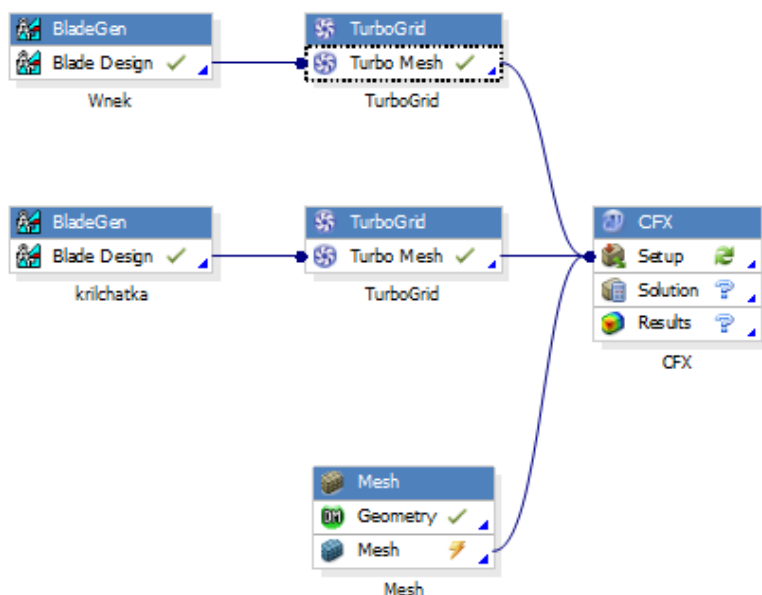


Рисунок 2.1 – Проект Workbench для CFD-расчёта насоса

Далее приведено описание сеткогенерации каждого элемента.

## 2.1 Создание сеточных моделей в TurboGrid

**Шаг 1.** В проекте Workbench из левого меню перетаскиваем объект TurboGrid и для удобства ставим его справа от геометрической модели шнека. Создаем связь между BladeGen и TurboGrid перетаскиванием объекта от первого ко второму (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Создание элемента Turbo-сетки в проекте

**Шаг 2.** Заходим в TurboGrid двойным щелчком на элементе TurboMesh.

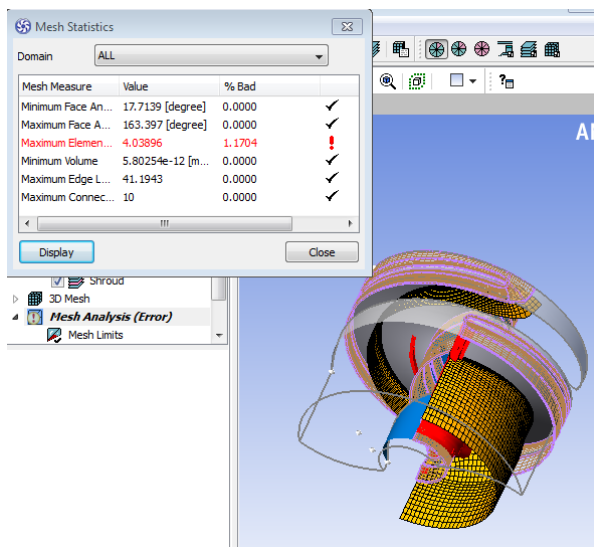
**Шаг 3.** Если необходимо, задаем параметры зазора на периферии (Shroud Tip). При первом расчёте можно ограничиться отсутствием учёта зазора. При последующих «проходах» по мере уточнения модели зазор можно добавить.

**Шаг 4.** Формируем топологию, «отжимая» пункт Suspended в контекстном меню элемента Topology. По умолчанию формируется топология ATM Optimized.

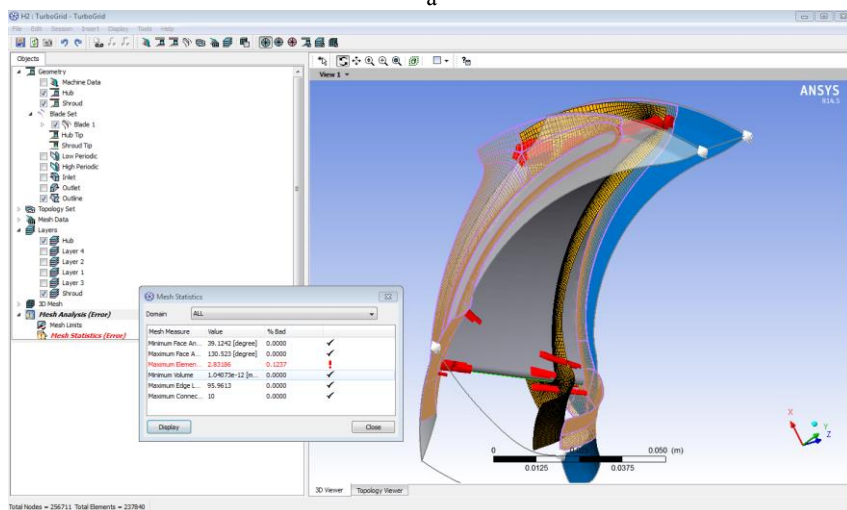
**Шаг 5.** Генерируем сетку правым кликом на Mesh→Create Mesh.

**Шаг 6.** По окончании генерации сетки просматриваем статистику (рисунок 2.3) и, если нет серьёзных проблем с сеткой (отрицательных объёмов, например), завершаем этап построения сетки на шнеке.

Для создания сетки на рабочем колесе необходимо повторить шаги 1-6.



а



б

Рисунок 2.3 – Внешний вид и статистика сетки в ANSYS TurboGrid:  
а - для шнека, б - для РК



## 2.2 Создание сеточных моделей в Meshing

**Шаг 7.** В компоненте улитки Mesh заходим в опцию создания сетки двойным нажатием по Mesh.

**Шаг 8.** Задаем расширенную размерную функцию ASF: On: Curvature с максимальным размером элемента по умолчанию (рисунок 2.4). Можно ограничить максимальный размер по желанию. Параметр Transition желательно задавать Fast.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (70,3950 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (1,8059e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (1,8059e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (3,6117e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,850 )
Minimum Edge Length	4,9644e-005 m

Рисунок 2.4 – Основные параметры сеткогенерации улитки

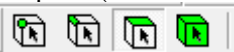
Details of "Patch Independent" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Independent
Element Midside Nodes	Use Global Setting
[-] Advanced	
Defined By	Max Element Size
<input type="checkbox"/> Max Element Size	5,e-003 m
<input type="checkbox"/> Feature Angle	30,0 °
Mesh Based Defeaturing	Off
Curvature and Proximity Refinement	Yes
<input type="checkbox"/> Min Size Limit	Default
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
Smooth Transition	Off
Growth Rate	Default
Minimum Edge Length	4,9644e-005 m
Write ICEM CFD Files	No

Рисунок 2.5 – Параметры алгоритма сеткогенерации

**Шаг 9.** Обязательно в области горла задать Face Sizing:

В правом меню выбираем Mesh→Insert→ Sizing.

Выбрать поверхности горла (не забыть переключиться в режим

выбора поверхностей  ) (рисунок 2.6) Значение Element Size рекомендуется устанавливать 0,5-0,05 мм.

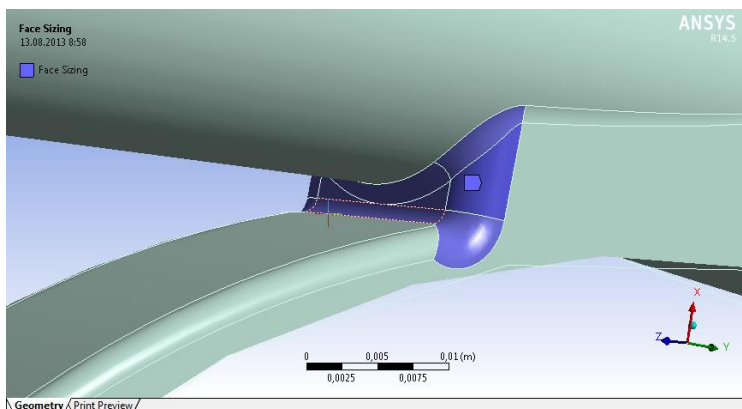


Рисунок 2.6 – Область горла улитки, подлежащая более точному разбиению

**Шаг 10.** Желательно также задать метод разбиения «Path Independent». В правом меню выбираем Mesh→Insert→Method. Выбрать все тело улитки. В разделе Definition выбрать метод Tetrahedrons и алгоритм Path Independent. Можно установить максимальный размер элемента либо использовать по умолчанию (рисунок 2.6).

**Шаг 11.** Генерируем сетку нажатием на кнопку Generate Mesh. Полученная в результате сетка будет иметь загущение в области горла (рисунок 2.7) - самой «проблемной» области с точки зрения как сеткогенерации (большая скошенность элементов), так и с точки зрения расчёта (большие градиенты давления).

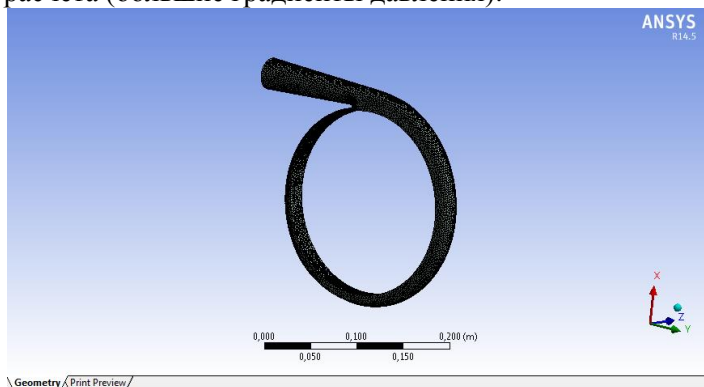


Рисунок 2.7 – Полученная сетка улитки

**Шаг 13.** После построения сетки можно проверить её качество. Для этого нужно в элементе *Mesh* -> *Statistics* выбрать любой параметр качества, например скошенность (*Skewness*). Появившаяся гистограмма (рисунок) иллюстрирует качество сетки, показывая количество элементов, обладающих той или иной скошенностью (рисунок 2.8).

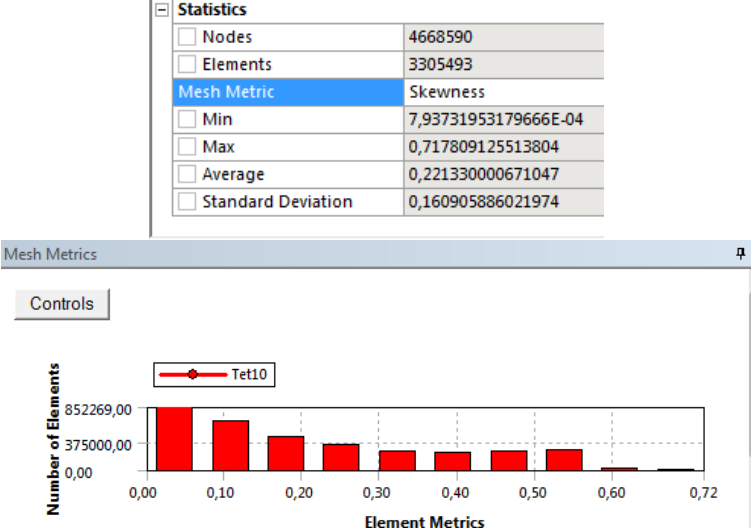


Рисунок 2.8 – Окно статистики и гистограмма параметра Skewness построенной сетки

**Шаг 14.** Выбрав в гистограмме столбец с самой большой скошенностью, можно просмотреть, где в сетке находятся самые «плохие» ячейки (рисунок 2.9).

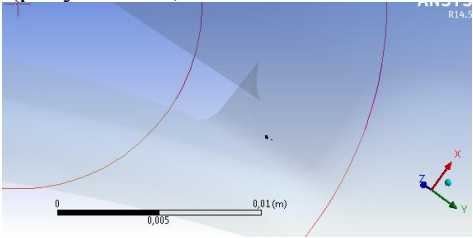


Рисунок 2.9 – Визуализация ячеек с самой сильной скошенностью

Изменяя параметры сетки, можно добиться минимального количества ячеек с плохим качеством, однако с увеличением качества

сетки неуклонно растёт её размер, т.е. время, необходимое для расчёта.

Желательно иметь параметры  $Skewness < 0,8$  и  $Element\ Quality > 0,4$ . Этого достаточно, чтобы CFD-расчёт не «разваливался», однако более качественная сетка даёт меньшие погрешности расчёта.

**Шаг 15.** После построения сетки нужно закрыть сеткогенератор и сохранить проект. Необходимо также убедиться, что элемент Mesh проекта Workbench имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку (рисунок 2.10). Иногда сетка бывает обозначена жёлтой молнией, при этом необходимо выполнить её дополнительное обновление, выбрав в контекстном меню элемента Mesh пункт

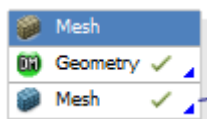
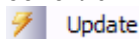


Рисунок 2.10 - Признак корректного выполнения сеткогенерации

Для создания сетки на входном участке насоса необходимо повторить шаги 7-15, кроме шага 9, поскольку на входном участке, как правило, отсутствуют ярко выраженные «проблемные» места (рисунок 2.11), а качество сетки даже с параметрами «по умолчанию» получается намного выше, чем у улитки (рисунки 2.12, 2.13).

Таким образом, чаще всего именно улитка является элементом модели, лимитирующим по качеству её сетки. Соответственно, именно в этом направлении следует проводить улучшение модели при необходимости устранения погрешностей расчёта.

После построения всех сеточных моделей можно переходить к созданию непосредственно модели течения в CFX-Pre (см. рисунок 2.1).

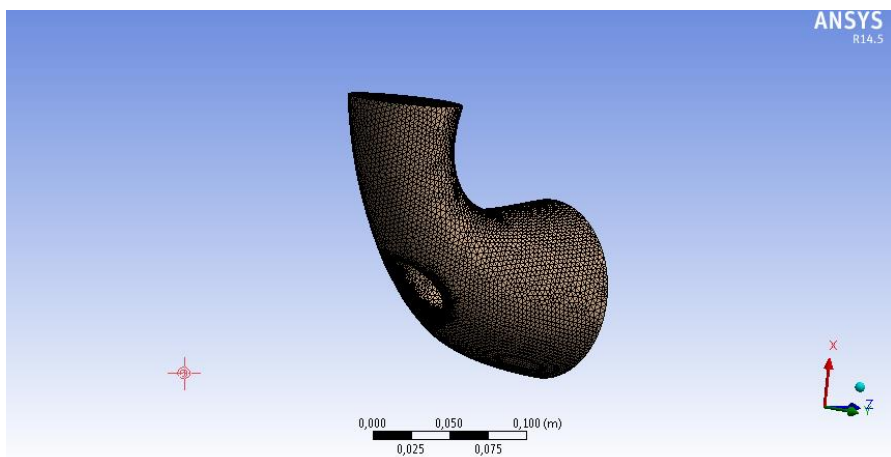


Рисунок 2.11 – Построенная сеточная модель входного участка

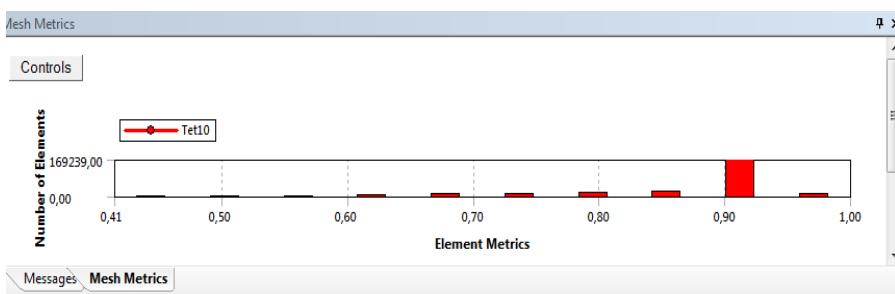


Рисунок 2.12 – Параметр Element Quality построенной сетки входного участка

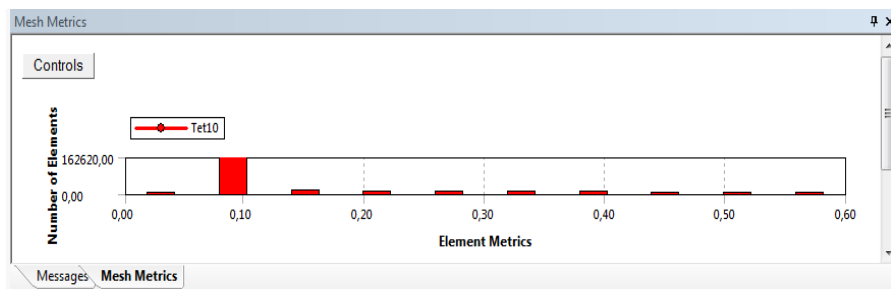


Рисунок 2.13 – Параметр Skewness построенной сетки входного участка

### 3 Создание расчётной модели насоса

На основе созданных в предыдущем разделе сеточных моделей создаётся единая расчётная модель путём наложения граничных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя. Основные параметры работы насоса приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Основные режимные параметры шнекоцентробежного насоса

№	Наименование	Обозначение	Значение	Размерность
1	Частота вращения ротора	$n$	45000	об/мин
2	Давление на входе в шнек	$p_{1ш}$	500	кПа
3	Массовый расход	$\dot{m}_o$	7,429	кг/с
4	Давление на выходе из насоса	$p_n$	9,778	МПа
5	Мощность насоса	$N_n$	1276	кВт

Рабочим телом для насоса является компонент топлива (горючее) - жидкий водород, поступающий в насос при температуре 20 К. В таблице 3.2 приведены его свойства при рабочей температуре.

Таблица 3.2 - Свойства рабочего тела – жидкого водорода при температуре 20 К

№	Наименование	Обозначение	Значение	Размерность
1	Молярная масса	$M$	2,0159	кг/кмоль
2	Плотность*	$\rho$	76,81	кг/м <sup>3</sup>
3	Динамическая вязкость	$\mu$	$8,6567 \cdot 10^{-6}$	Па·с

\* Несмотря на то, что плотность жидкого водорода при изменяющемся давлении не является постоянной величиной (подробнее см. раздел 6), на первом этапе она принимается постоянной и равной среднему значению также, как при традиционном проектировании [13 ... 17].

Далее приведено пошаговое описание процесса формирования расчётной модели с данными условиями.

**Шаг 1.** В проекте Workbench из левого меню перетаскиваем объект CFX из меню Component Systems. Устанавливаем связи между сетками построенных моделей и элементом Setup в объекте CFX (рисунок 2.1).

**Шаг 2.** Запустить препроцессор, дважды щелкнув по элементу Setup. После загрузки препроцессора на экране отобразится модель

(рисунок 3.1). Необходимо проконтролировать, что все сеточные элементы стоят на требуемых местах друг относительно друга, между ними нет зазоров и взаимопересечений. Если ошибки позиционирования имеются, их нужно устранить повторным созданием сетки с требуемыми геометрическими параметрами. Также в CFX существует возможность геометрического сдвига сетки через контекстное меню элемента Mesh в дереве проекта (Mesh -> Transform Mesh).

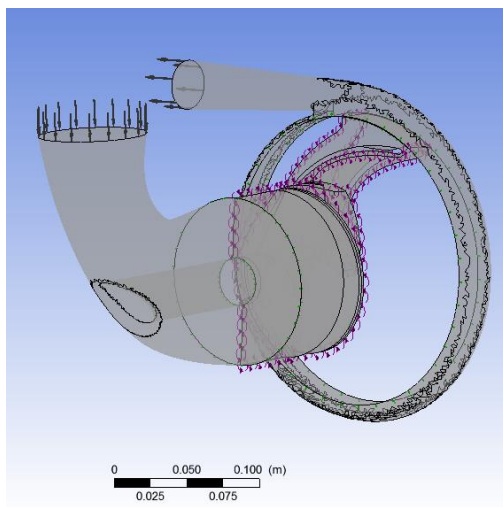






Рисунок 3.1 – Вид модели в окне CFX-Pre

Далее необходимо задать свойства рабочего тела в соответствии с таблицей 3.2. Проще всего это сделать путём модификации свойств любого вещества из библиотеки ANSYS, например воды. Поскольку рабочий процесс насоса будет моделироваться без учёта изменения температуры рабочего тела, то такие свойства, как теплоёмкость (Heat Capacity), теплопроводность (Thermal Conductivity), энтальпия (Enthalpy), энтропия (Entropy), коэффициент теплового расширения (Thermal Expansion Coefficient) - можно не задавать (оставить как у воды), поскольку в расчёте они использоваться не будут. Однако обязательно нужно задать гидравлические характеристики жидкости, такие как плотность (Density) и динамическая вязкость (Transport Properties -> Dynamic Viscosity).

**Шаг 3.** Переименовать вещество из стандартной библиотеки ANSYS «Вода» в «LH». Для этого в дереве проекта нужно развернуть список веществ (  **Materials** ), найти там воду (  **Water** ) и переименовать её в «LH» (латиницей), используя пункт ‘ **Rename**’ контекстного меню. (Внимание: не перепутайте воду в жидком агрегатном состоянии (Water) с водяным паром с параметрами идеального газа (Water Ideal Gas)).

**Шаг 4.** Модифицировать свойства вещества  **LH** . Для этого нужно открыть окно параметров рабочего тела, дважды щёлкнув по элементу «LH» левой кнопкой мыши (рисунок 3.2). На вкладке Basic Settings (основные настройки) не нужно ничего менять, а на вкладке Material Properties (Свойства вещества) нужно задать значения молярной массы, плотности и динамической вязкости в соответствующие поля. Следует обратить внимание, что все числовые параметры в CFX задаются с точкой в качестве разделителя целой и дробной части. Запятую CFX воспринимает как неверный символ. Те свойства, которые не используются в данном расчёте, можно отключить, убрав «галочку». По завершении задания свойств нужно закрыть окно, нажав ОК.

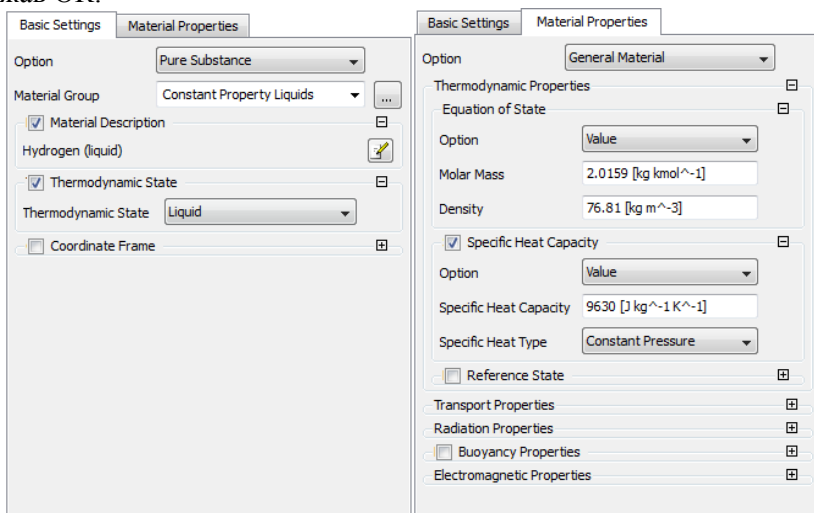



Рисунок 3.2 – Параметры рабочего тела



**Шаг 5.** Создать расчётную зону для области течения шнека. Для этого выполнить команду главного меню Insert ->  Domain . Затем задать имя новой зоны - «Wnek» (рисунок 3.3).

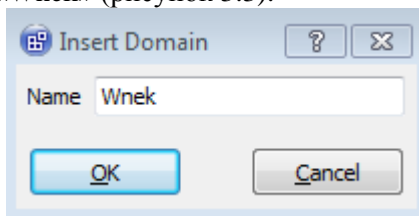



Рисунок 3.3 - Добавление новой расчётной зоны

**Шаг 6.** Задать основные параметры (*Basic Settings*) зоны Wnek. Для этого на первой вкладке задать размещение (*Location*) зоны Wnek - на геометрии ротора насоса, выбрав один из двух пунктов. В качестве вещества (*Material*) выбрать «LH». Reference Pressure установить 0. Задать опцию движения зоны (*Domain Motion*) - вращение (*Rotating*) и указать скорость вращения (*Angular Velocity*) - 45000 об/мин, и задать ось вращения (*Rotation Axis*) - глобальную ось Z (*Global Z*). Необходимо правильно указать ось и направление вращения! В программе ANSYS CFX по умолчанию осью вращения является ось Z, а направление вращения определяется по правилу правого буравчика. При задании частоты вращения также необходимо обращать внимание на единицы измерения - как правило, задавать частоту вращения удобнее в оборотах в минуту ( $rev\ min^{-1}$ ), хоть по умолчанию в поле для ввода единиц измерения частоты вращения используют радианы в секунду ( $rad\ s^{-1}$ ).

По окончании задания свойств рабочей зоны ротора нажать OK.

**Шаг 7.** По аналогии со шнеком добавить зону потока РК - Krilchatka.


**Шаг 8.** Аналогичным образом добавить зоны потока Ulitka и Vhod, повторяя шаги 4-5. В качестве размещения (*Locations*) указать элемент спирального сборника и элемент входа соответственно. Опцию движения этих зон нужно оставить по умолчанию «неподвижная» (*Domain Motion - Stationary*). В результате проект должен содержать четыре зоны (см. рисунок 3.1): две подвижные и две неподвижные.

**Шаг 9.** Создать интерфейс перехода потока из входной зоны в шнек. Для этого добавить интерфейс Insert ->  **Domain Interface**, задать название «Vhod to Wnek», задать в качестве первой стороны (Side 1) - зону Vhod и её выходную границу, в качестве второй стороны (Side 2) - зону Wnek и её входную границу. Также нужно задать модель смешения потоков (Mixing Model) *Stage* (ступень).

**Шаг 10.** Аналогично шагу 9 создать интерфейс перехода потока из шнека в рабочее колесо. Модель смешения потоков не требуется, поэтому нужно оставить опцию General Interface и None.


**Шаг 11.** Аналогично шагу 9 создать интерфейс перехода потока из рабочего колеса - в улитку.


**Шаг 12.** Создать входную границу на зоне Vhod:

Insert ->  **Boundary** -> in Vhod.

Назвать границу «inlet», задать тип (Type) Inlet, расположение (Location) - на входном элементе сетки. Установить параметры течения: полное давления на входе (Total Pressure -> 500 kPa), направление потока - перпендикулярно граничному условию (Flow Direction -> Normal to Boundary Condition), параметры турбулентности: средняя, с величиной пульсационной составляющей скорости 5% по отношению к средней скорости потока (Turbulence -> Medium (Intensity = 5%)).


**Шаг 13.** Создать выходную границу на сборной улитке: Insert ->

 **Boundary** -> in Ulitka. Назвать границу «outlet», задать параметры: тип (Type) Outlet, расположение (Location) на выходной границе, массовый расход (Mass Flow Rate) -> 7.429 kg/s.


**Шаг 14.** Создать неподвижную стенку на внешней поверхности зоны шнека: Insert ->  **Boundary** -> in Wnek. Назвать границу «WnekStatWall», задать параметры: типа (Type) - стенка (Wall), расположение (Location) - на внешней поверхности области течения шнека, Frame Type -> Rotating (система координат границы - вращающаяся, т.е. локальная система координат шнека, поскольку данная стенка принадлежит вращающейся зоне), Mass and Momentum

-> No Slip Wall (опция переноса массы и количества движения - нескользкая стенка), Wall Velocity -> Counter Rotating Wall (опция задания скорости стенки - стенка противовращения. Тем самым абсолютная скорость стенки окажется равной нулю), Wall Roughness -> Smooth Wall (опция шероховатости стенки - гладкая стенка).

**Шаг 15.** Аналогично шагу 14 создать границу «RKStatWall» - неподвижную стенку на внешней поверхности зоны РК.

**Шаг 16.** Создать периодический интерфейс для РК. Для этого добавить интерфейс Insert ->  Domain Interface, задать название «RK Periodic», задать в качестве первой сторон (Side 1, Side 2) - периодические стороны зоны RK. Тип интерфейса задать Rotational Periodicity, указать ось вращения.

**Шаг 17.** Если используется периодическая модель для шнека с двумя и более заходами, то необходимо добавить периодический интерфейс для зоны Wnek аналогично шагу 16.

**Шаг 18.** Задать параметры решателя, используя элемент дерева проекта  Solver Control. Нужно установить максимальное количество итераций 200, т.к. задаваемых по умолчанию 100 итераций часто бывает недостаточно.

Если пробные расчеты покажут, что расчёт не успевает сходиться за указанное число итераций, необходимо поставить большее количество.

**Шаг 19.** Завершить построение модели, закрыв препроцессор. Проект можно сохранить.

## 4 Поиск решения

Отыскание решения задачи течения с помощью построенной модели выполняется в так называемом «решателе» (Solver).

**Шаг 1.** Открыть решатель двойным щелчком на элементе Solution (рисунок 4.1).

**Шаг 2.** Задать параметры многопроцессорного расчёта (рисунок 4.1): Run Mode -> HP Local Parallel (режим распараллеливания задачи - локальный с общей памятью), число параллельных процессов - 2 (или более, по количеству свободных процессоров на используемом компьютере), включить галочку Show Advanced Controls и на вкладке Partitioner установить опцию распараллеливания многозонной задачи Multidomain Option -> Coupled Partitioning.

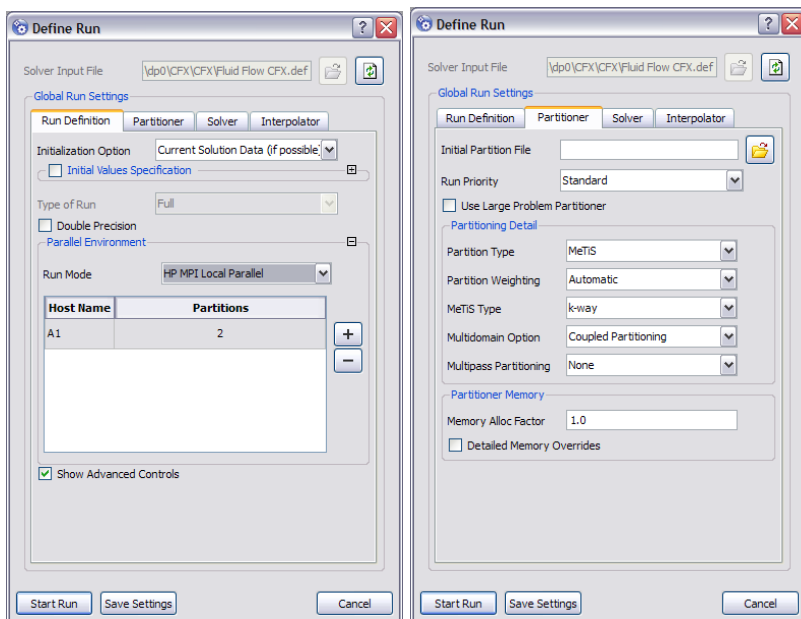


Рисунок 4.1 - Параметры запуска решателя

**Шаг 3.** Запустить расчёт, нажав Start Run. Следить за снижением невязок и сообщениями решателя (рисунок 4.2).

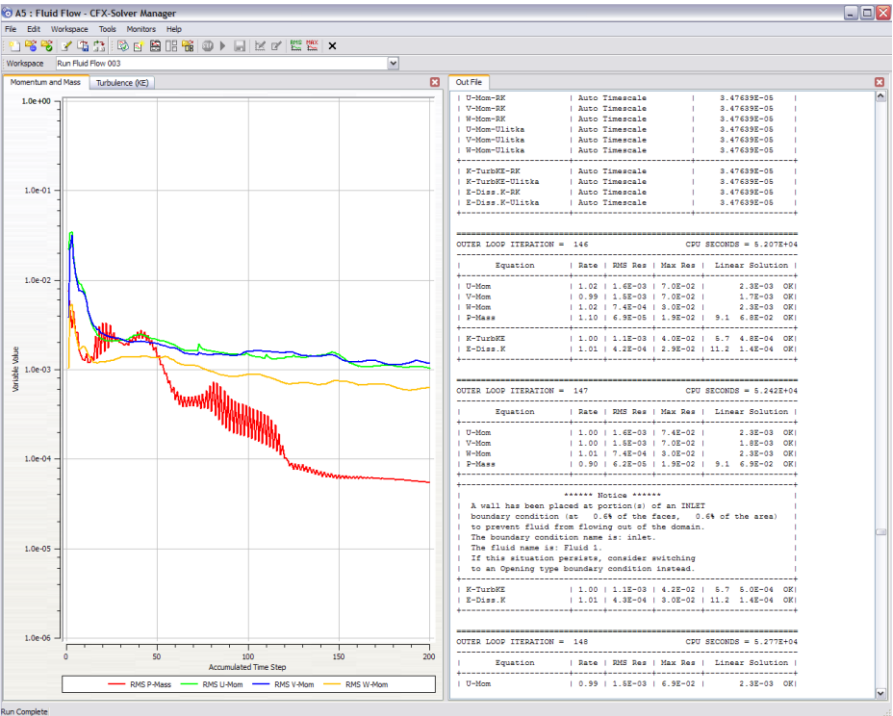


Рисунок 4.2 - Окно решателя в конце процесса решения

Иногда решатель не запускается. Причиной этому могут быть ошибки в модели, неправильная работа алгоритмов или даже проблемы операционной системы (лицензионные ошибки, доступ к диску и т.п.). Все сообщения об ошибках выводятся в окно решателя (см. рисунок 4.2). Наиболее часто встречающейся ошибкой при решении задач в параллельном режиме является неправильное выделение памяти. Решатель при этом выдаёт сообщение о том, какого количества памяти не хватило для работы алгоритма. Выделение памяти можно пропорционально увеличить, используя повышающий коэффициент Memory Alloc Factor (см. рисунок 4.1): 1.2, 1.5, 2 и т.д.

Иногда задача запускается (начинаются итерации), но затем задача некорректно завершается («разваливается»). Это происходит из-за слишком больших градиентов параметров на начальном этапе счёта. Причиной этого могут быть как ошибки в создании модели (сетка с плохим качеством, неправильно введенные числовые параметры), так и слишком высокая скорость решения задач с большими перепадами параметров, коими являются элементы ракетных двигателей.

В случае, если модель не содержит ошибок, но, тем не менее, не считается, можно:

1. снизить скорость решения, поставив на начальном этапе решения параметр Timescale Factor менее 1 (0,1; 0,01; 0,001 и т.д.). По мере стабилизации расчёта данный параметр можно ступенчато возвращать к первоначальному значению.

2. снизить рабочие параметры рассчитываемого насоса до уровня, на котором расчёт выполнится корректно. Далее нужно повторять запуски, каждый раз понемногу повышая параметры и проводя начальную инициализацию от результатов предыдущего расчёта, и таким образом вывести расчётную систему на нужный режим.

**Шаг 4.** После завершения расчёта необходимо закрыть решатель. Признаком правильного завершения расчёта является зелёная галочка у элемента Solver в проекте Workbench.

## 5 Анализ результатов

Для анализа результатов моделирования их необходимо представить в виде полей параметров, линий тока, интегральных значений параметров. Эти процедуры выполняются в пост-процессоре CFD-Post.

**Шаг 1.** Запустить пост-процессор двойным щелчком на элементе Results.

**Шаг 2.** Создать геометрические элементы для визуализации потока: плоскости, проходящие через улитку и вдоль меридионального сечения насоса: Insert→Location→Plane. Расположить плоскость, как показано на рисунке 5.1.

**Шаг 3.** Создать контур поля давления (Insert→Contour) на плоскостях, созданных на шаге 2 (рисунок 5.1).

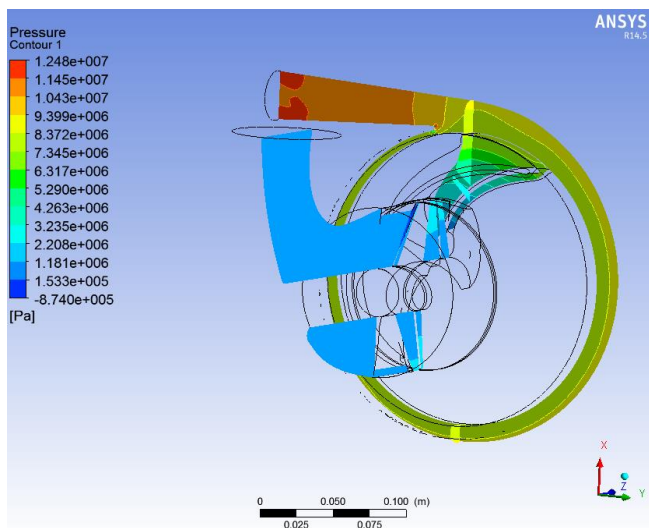


Рисунок 5.1 – Результат визуализации полей давления

Аналогично шагу 3 создать контуры полей полного давления в неподвижной системе координат (Total Pressure in Stn Frame),

абсолютной скорости (Velocity in Stn Frame) и других интересующих параметров (рисунок 5.2, 5.3).

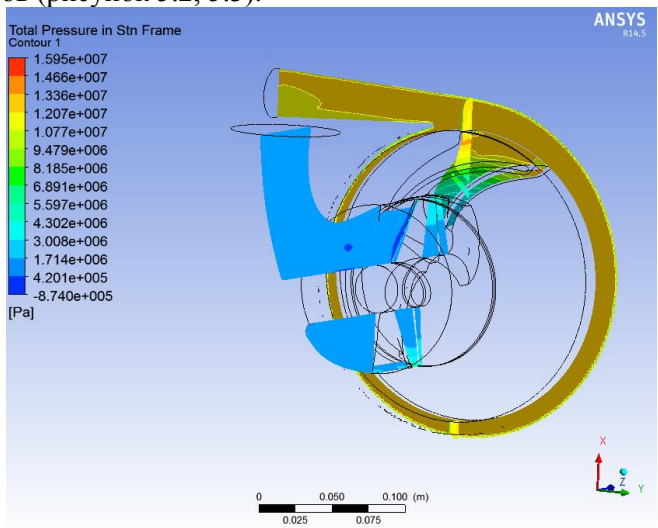


Рисунок 5.2 – Результат визуализации абсолютного полного давления

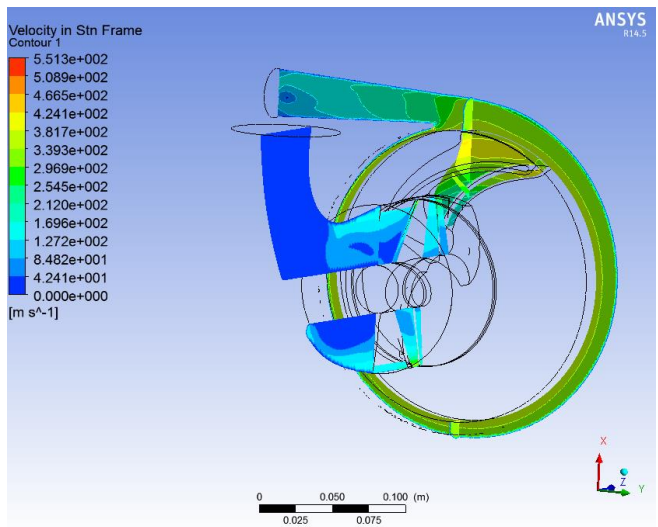


Рисунок 5.3 – Результат визуализации полей абсолютной скорости



**Шаг 4.** Также можно построить векторное поле на одной из плоскостей (рисунок 5.4).

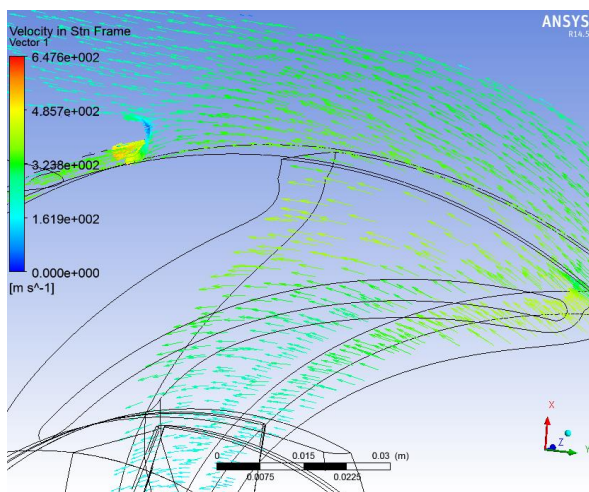


Рисунок 5.4 - Распределение векторов абсолютных скоростей

При анализе результатов можно видеть, что на картинах давления присутствуют области с отрицательным полным давлением, измеренным в неподвижной системе координат (см. рисунок 5.2). Это противоречащее законам физики поведение потока объясняется ошибками моделирования. Главной методологической ошибкой является отсутствие моделирования кавитации. В реальном физическом процессе давление жидкости конечно не может понизиться не только ниже нуля, но и меньше давления насыщенных паров при данной температуре. Как только давление снижается ниже, наступает разрыв сплошности течения - переход части жидкости в газовую фазу. Поскольку в данном случае такой межфазный переход не моделировался (хотя с применением специальных моделей кавитации можно реализовать такой CFD-расчёт) и течение является абсолютно сплошным, то местное увеличение скорости потока вызывает снижение давления даже при его уровне ниже уровня насыщения. При этом программа, вычисляя уровень полученного давления, математически вычитает из прежнего уровня давления

разницу, определяемую разгоном потока, и формально может получить отрицательное значение давления. Чем более несплошной («рваной») является картина течения, чем сильнее проявляются данные эффекты. Поскольку решение идёт на сетке конечной размерности, данные эффекты сильнее проявляются на грубой сетке.

**Шаг 5.** Чтобы выявить области с отрицательным давлением, можно создать изоповерхность нулевого давления: Insert → Location → IsoSurface, в качестве переменной указав Total Pressure in Stn Frame, равное нулю (рисунок 5.5).

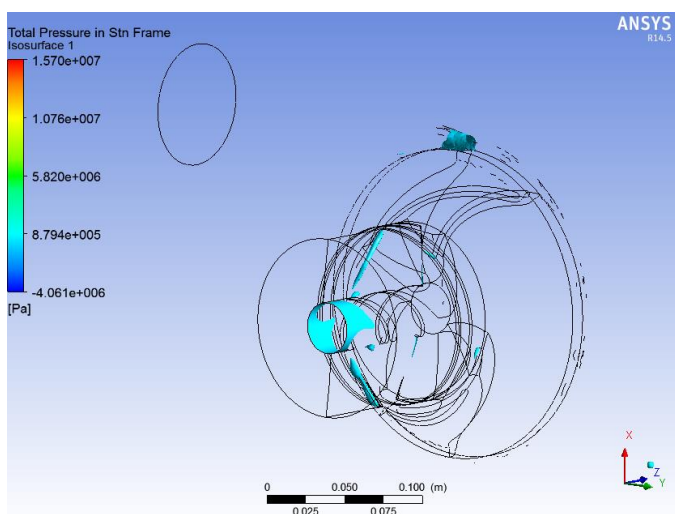


Рисунок 5.5 – Области с отрицательным абсолютным полным давлением

Оценивая области отрицательного давления, можно сделать вывод, в каких областях следует дополнительно измельчить расчётную сетку. Как правило, это входные кромки лопаточных элементов и прилегающие к ним области спинок лопаток, а также области горла спирального сборника и конического диффузора. Измельчение сетки на данных областях позволяет уменьшить или совсем исключить области отрицательного давления (рисунок 5.6).

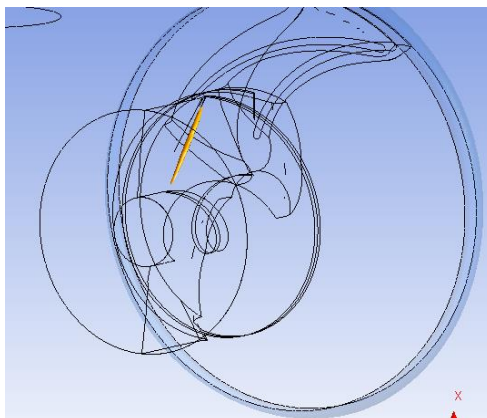


Рисунок 5.6 – Области с отрицательным абсолютным полным давлением в модели с уточненной сеткой имеют меньшую протяженность

**Шаг 6.** Для оценки интегральных параметров потока необходимо перейти на вкладку Calculators и выбрать (дважды щелкнуть) Function Calculator.

**Шаг 7.** Используя калькулятор функций, нужно оценить значение расхода (massFlow) на входной границе (inlet) (рисунок 5.7) и крутящего момента (torque) относительно оси Z на непроницаемых стенках рабочего колеса и шнека (Wnek Default и RK Default) (рисунок 5.8). Следует иметь ввиду, что крутящий момент определяется для одного межлопаточного канала РК, чтобы найти момент на колесе, нужно умножить его на количество лопаток:

$$M_{\text{ротора}} = M_{\text{РКZРК}} + M_{\text{шZш}}$$

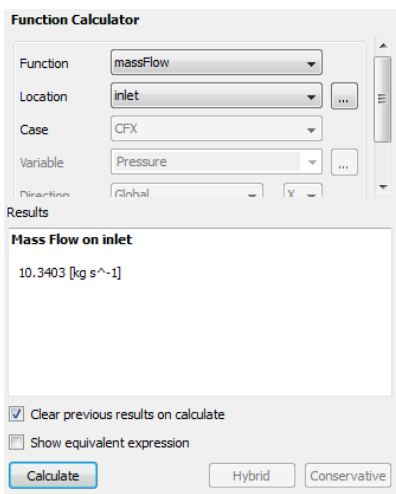


Рисунок 5.7 – Определение расхода на входе в насос

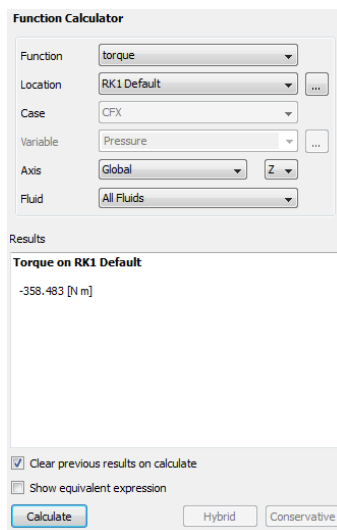


Рисунок 5.8 – Определение момента на валу ротора

**Шаг 8.** Для определения углов потока в характерных сечениях насоса необходимо вычислить проекционные составляющие скоростей потока. Для этого нужно перейти на вкладку Turbo (правее Calculators) и нажать Calculate Velocity Components. Затем опять вернуться на вкладку Calculators. Кроме того, для включения дополнительных функций анализа турбомашин, можно выполнить не только расчёт компонентов скоростей, а полную инициализацию Turbo-компонентов (шнек, рабочее колесо), но перед этим каждый венец необходимо дополнительно настроить (рисунок 5.9).

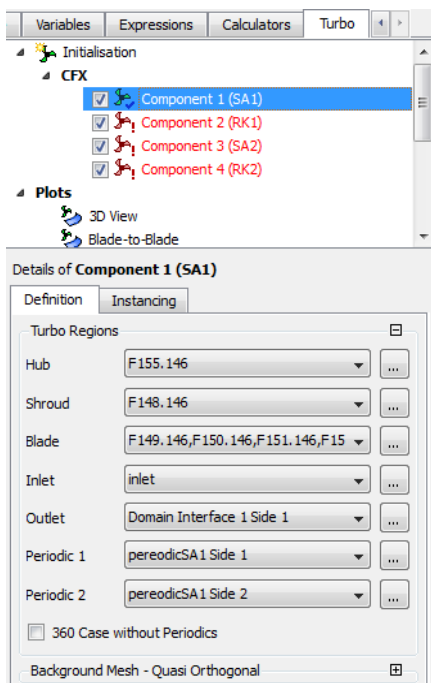


Рисунок 5.9 – Инициализация турбо-компонентов

**Шаг 9.** Определить среднерасходные (mass FlowAve) компоненты скорости на входе в шнек: осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 5.10). «Минус» окружной скорости на выходе соответствует её противоположному направлению в цилиндрической системе координат. На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол потока, например:

$$\beta_1 = \arctg \frac{w_{1a}}{w_{1u}} = \arctg \frac{139,601}{305,902} = 24,53^\circ$$

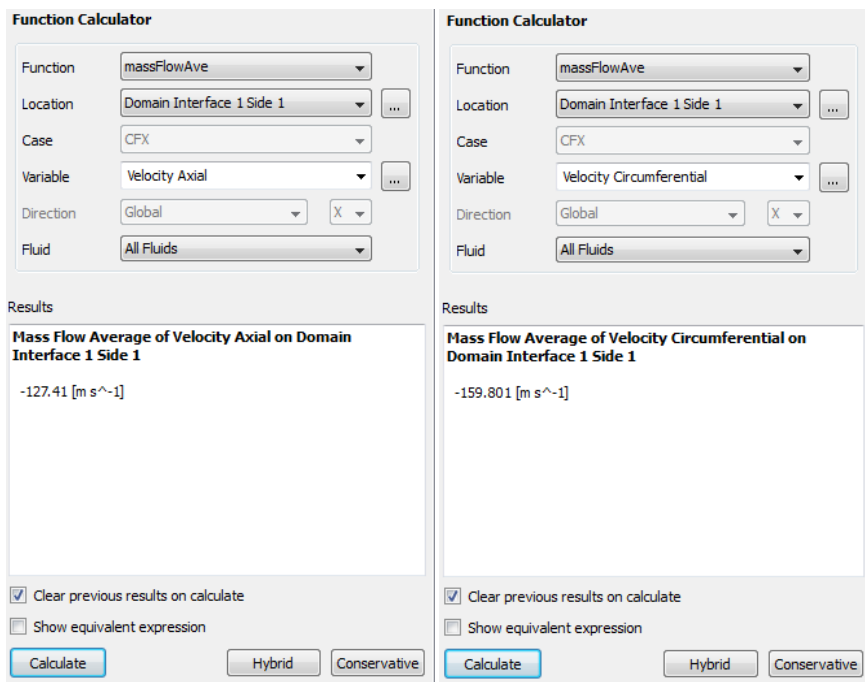


Рисунок 5.10 – Определение компонентов абсолютных скоростей

**Шаг 10.** Аналогично шагу 9 определить среднерасходные (mass Flow Ave) компоненты скорости в относительном движении на входе в РК, а также выходе из него.

**Шаг 11.** Аналогично шагам 9 и 10 определить среднерасходные (mass Flow Ave) компоненты скорости в абсолютном движении во всех сечениях, используя переменные скоростей с приставкой «in Stn Frame» (в стационарной системе координат).

Следует помнить, что скорости в CFD-Post оцениваются в относительном выражении относительно той зоны, в которой они определяются. То есть, если оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей неподвижной зоне, то результатом будут значения скорости относительно неподвижной зоны, соответственно это будут абсолютные скорости ( $c$ ). Если же оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей вращающейся зоне, то результатом будут

значения скорости относительно движущейся зоны, т.е. относительные ( $w$ ). Если же необходимо оценить абсолютные значения скоростей на движущихся границах, следует использовать особый параметр – Velocity in St(atio)n(ary) Frame (скорость в неподвижной системе координат).

**Шаг 12.** По вычисленным значениям компонентов скоростей найти значения углов потока в характерных сечениях потока.

**Шаг 13.** Провести сравнение полученных результатов с имеющимися данными аналитического расчёта или эксперимента, сравнив треугольники скоростей и интегральные параметры (таблица 5.1).

Сравнивая результаты можно увидеть, что даже с учетом погрешностей обоих расчётов их результаты качественно не совпадают. Причиной этому могут быть ошибки при CFD-моделировании. Так, например, частой ошибкой является задание направления вращения не в ту сторону. В случае обнаружения ошибок моделирования необходимо их устранить и заново провести расчёт с верными параметрами. При проведении реальных (не учебных) расчётов такая ситуация нередка и для устранения всех ошибок, как правило, приходится повторять расчёт 3-5 раз, до тех пор, пока не будет достигнуто качественное совпадение.

Если качественное совпадение результатов достигнуто, то различия в результатах, как правило, связаны с расчётными ошибками. Их можно уменьшить несколькими способами:

1. Провести большее количество итераций для лучшего сведения расчёта, выставив больший параметр Max Iterations на завершающем этапе расчёта.

2. Увеличить качество сетки (измельчить элементы в области высоких градиентов параметров).

3. Применить более точную модель турбулентности, например SST вместо k-epsilon. Для модели SST необходимо разрешение пограничных слоёв не менее, чем 10-ю узлами сетки.

4. Более точно задать параметры рабочего тела: заменить константы выражениями или таблицами, более точно задать вязкость и теплопроводность генераторного газа, поскольку в данном расчёте использовались параметры воздуха.

Поскольку жидкий водород - среда с весьма необычными для жидкости свойствами (изменение плотности при изменении давления), то применение константных свойств потока в проведенном расчёте может приводить к существенной погрешность. В следующем разделе приведены способы уточненного задания свойств водорода.

Таблица 5.1 – Сравнение проектного расчета с данными, полученными в ANSYS

Вид расчёта	Проектный расчет	CFD – расчёт
Вход		
$p_{вх}$ , кПа	496,8	480,5
$p_{вх}^*$ , кПа	500,0	499,9
$C_{вход}$	9,191	22,27
Шнек		
$p_{1шн}$ , Па	494,2	366,5
$p_{1шн}^*$ , Па	498,8	331,9
$W_{ср}$	175,5	109,8
$C_1$	11,03	27,51
$W_{2\_и\_ср}$	53,07	63,74
$W_{2\_ср}$	54,21	67,53
$C_{2\_и\_ср}$	121,0	113,7
$C_{2\_ср}$	121,5	116,2
$\beta_{1\_ср}$ , град	3,602	8,925
$\beta_2$ , град	30,85	19,79
$\alpha_{2\_ср}$ , град	5,209	11,41
$p_1$ , МПа	1,068	1,081
$p_1^*$ , МПа	1,430	1,633



Таблица 5.1 – Продолжение

Вид расчёта	Проектный расчет	CFD – расчёт
ЦБРК		
$p_2$ , МПа	6,458	7,493
$p_2^*$ , МПа	10,61	12,79
$C_{1\_ц\_т}$	8,786	20,112
$C_{1\_ц\_и}$	96,787	115,562
$C_{1\_ц}$	97,185	117,299
$U_{1\_ц}$	218.986	
$W_{1\_ц\_и}$	122.2	61.685
$W_{1\_ц}$	122.515	63.7542
$U_2$	442.965	
$C_{2\_м}$	8.525	36,974
$C_{2\_и}$	328.543	376.322
$C_2$	328.654	378.134
$W_{2\_и}$	114.421	92.5524
$W_2$	114.739	98.9461
$\beta_{1\_ц}$ , град	4.113	18,058
$\beta_2$ , град	4.261	21,776
$\alpha_{1\_ц}$ , град	5.187	9,873
$\alpha_2$ , град	1.486	5,611
Выход		
$p_{\text{ВЫХ}}$ , МПа	9,761	10,96
$p_{\text{ВЫХ}}^*$ , МПа	9,778	12,06
$C_{\text{ВЫХОД}}$	20	163,311

## **6 Моделирование с учетом переменных свойств жидкого водорода**

Жидкий водород по сравнению с другими компонентами ракетного топлива имеет следующие особенности [7 - 12]:

- низкая плотность, отличающая от плотности других жидких компонентов более, чем на порядок;
- самая низкая температура кипения, равная 20,4 К при давлении 0,1 МПа;
- узкий температурный диапазон жидкого состояния водорода от 13,9 до 20,4 К при давлении 0,1 МПа;
- низкие значения критической температуры 33,2 К и критического давления 1,273 МПа;
- более высокое значение теплоты испарения жидкого водорода 454 кДж/кг по сравнению с теплотой испарения широко распространенного горючего в ЖРД керосина 343 кДж/кг;
- водород, как и кислород, являются экологически чистыми компонентами ракетного топлива.

Характерной и важной особенностью физических свойств жидкого водорода является *зависимость свойств не только от температуры, но и от давления*, а также от содержания *пара- и ортомодификаций* (или пара- и ортоформ) [7-12].

Для водорода характерен особый случай аллотропии (аллотропия — свойство химического элемента существовать в виде нескольких форм простых веществ). Молекулы водорода существуют в двух ядерно-изомерных формах спина: ортоформе и параформе. Существование двух модификаций молекул водорода связано с различной взаимной ориентацией ядерных спинов атомов и, следовательно, с различными значениями вращательных квантовых чисел. В молекулах параводорода ядерные спины антипараллельны и вращательные квантовые числа четные. Ортоводород имеет параллельные спины и нечетные квантовые числа. Ядерная спиновая изомерия является исходной причиной различных магнитных, спектральных и термических свойств обеих модификаций. Пара- и ортомодификации водорода обладают различным количеством вращательной энергии и поэтому имеют несколько различающиеся теплоемкости, теплопроводности, давления насыщенных паров, температуры плавления. По химическому поведению пара- и

ортоводород одинаковы. Параводород в чистом состоянии стабилен только при температурах, близких к абсолютному нулю.

При обычной (комнатной) температуре водород имеет следующий равновесный состав: 75% параформы и по 25% ортоформы. Водород такого состава считается нормальным и обозначается как нормальный водород  $n\text{-H}_2$ . Соотношение орто- и параформы не меняется, если температура выше 25 °С. При температуре 20,4 К в равновесном водороде содержится около 0,21% ортоформы  $o\text{-H}_2$  — такой водород отождествляется с параводородом ( $n\text{-H}_2$ ).

Зависимости плотности от температуры при различных давлениях, а также  $I$ - $S$ -диаграмма жидкого водорода, приведены в таблице 6.1 и на рисунках 6.1 и 6.2.

При моделировании в ANSYS существует возможность задавать переменные параметры рабочего тела как в виде функциональных зависимостей так и в табличном виде.

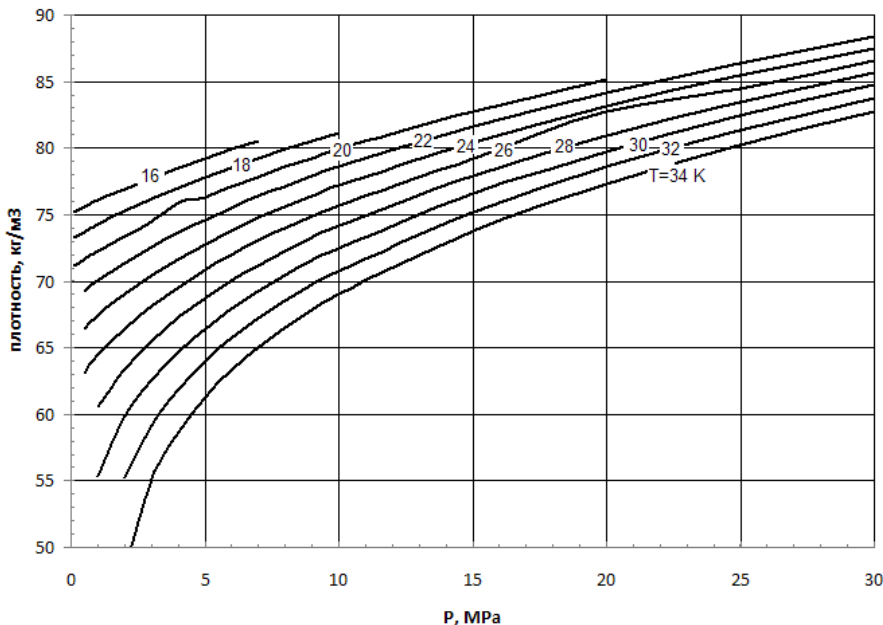


Рисунок 6.1 - Зависимость плотности водорода от давления и температуры

Таблица 6.1 - Плотность (в кг/м<sup>3</sup>) нормального водорода при различных температурах  $T$  и давлениях  $p$  [11]

$T, K$	$P, \text{ МПа}$								
	0,1	0,2	0,6	1,0	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0
14	77,120	—	—	—	—	—	—	—	—
16	75,475	75,559	75,929	76,303	76,826	77,150	77,925	78,686	79,367
18	73,628	73,735	74,169	74,581	75,165	75,531	76,419	77,239	78,016
20	71,512	71,639	72,152	72,620	73,306	73,735	74,719	75,645	76,506
22	1,1920	69,228	69,779	70,413	71,209	71,716	72,803	73,898	74,858
24	1,0750	2,318	67,153	67,876	68,850	69,443	70,809	71,997	73,067
26	0,9794	2,077	63,916	64,883	66,139	66,885	68,499	69,900	71,134
28	0,9021	1,888	59,749	61,200	62,939	63,957	65,945	67,603	69,039
30	0,8361	1,735	6,384	56,138	58,962	60,339	63,017	65,072	66,752
32	0,7789	1,607	5,628	12,584	53,444	55,812	59,643	62,239	64,242
34	0,7305	1,499	5,080	10,166	42,042	49,217	55,581	59,049	61,555
36	0,6875	1,405	4,655	8,850	20,554	36,908	50,537	55,413	58,568
38	0,6494	1,323	4,309	7,949	15,873	24,744	44,122	51,231	55,276
40	0,6155	1,251	4,021	7,267	13,594	19,478	36,949	46,525	51,690
50	0,4888	0,986	3,057	5,274	8,904	11,533	18,911	26,725	33,728
60	0,4059	0,815	2,491	4,226	6,937	8,815	14,297	18,805	23,834
70	0,3473	0,696	2,110	3,551	5,758	7,257	11,070	14,933	18,788
80	0,3035	0,608	1,834	3,072	4,949	6,212	9,385	12,560	15,713
90	0,2696	0,539	1,638	2,712	4,352	5,448	8,188	10,915	13,603
100	0,2425	0,485	1,457	2,430	3,890	4,862	7,286	9,683	12,043

Продолжение таблицы 6.1

$T, K$	$P, \text{ МПа}$								
	5,066	7,599	10,132	12,666	15,199	20,265	25,331	40,530	50,662
20,34	75,888	77,980	79,692	81,262	82,700	85,020	87,08	—	—
21,15	75,332	77,428	79,192	80,958	82,300	84,650	86,80	—	—
22,15	74,750	76,800	78,650	80,420	81,760	84,250	86,43	—	—
23,15	73,820	76,080	78,070	79,750	81,250	83,820	87,07	—	—
24,15	73,160	75,350	77,430	79,350	80,730	83,340	85,63	91,50	—
25,15	72,037	74,580	76,750	78,555	80,150	82,850	85,20	91,10	93,95
26,15	71,370	73,900	76,140	77,960	79,570	82,330	84,75	90,70	93,60
27,15	70,175	73,038	75,450	77,400	78,950	81,780	84,28	90,25	93,22
28,15	69,250	72,070	74,670	76,670	78,300	81,200	83,62	89,85	92,90
29,15	68,100	71,150	73,675	75,825	77,630	80,625	83,30	89,50	92,50
30,15	66,870	70,150	73,000	75,070	76,950	80,000	82,80	89,05	92,15
31,15	65,570	69,200	72,032	74,300	76,250	79,420	82,28	88,60	91,77
32,15	64,150	68,100	71,100	73,450	75,500	78,770	81,75	88,15	91,40
33,15	62,700	66,950	70,120	72,650	74,750	78,170	81,18	87,75	91,00
34,15	61,075	65,840	69,100	71,750	73,950	77,550	80,59	87,25	90,62
35,15	59,470	64,552	68,100	70,950	73,280	76,920	80,00	86,80	90,25
36,15	57,850	63,370	67,130	69,950	72,400	76,250	79,450	85,400	89,900
37,15	56,230	62,225	66,160	69,145	71,620	75,600	78,855	85,945	89,465
38,15	54,600	61,050	65,295	68,250	70,735	74,950	78,275	85,500	89,075
39,15	53,000	59,850	64,280	67,450	70,050	74,270	77,670	85,050	88,675
40,15	51,400	58,680	63,270	66,525	69,265	73,625	77,055	84,610	88,300
41,15	49,800	57,470	62,250	65,640	68,510	72,950	76,415	84,165	87,895
42,15	48,175	56,250	61,250	64,790	67,715	72,235	75,770	83,725	87,490

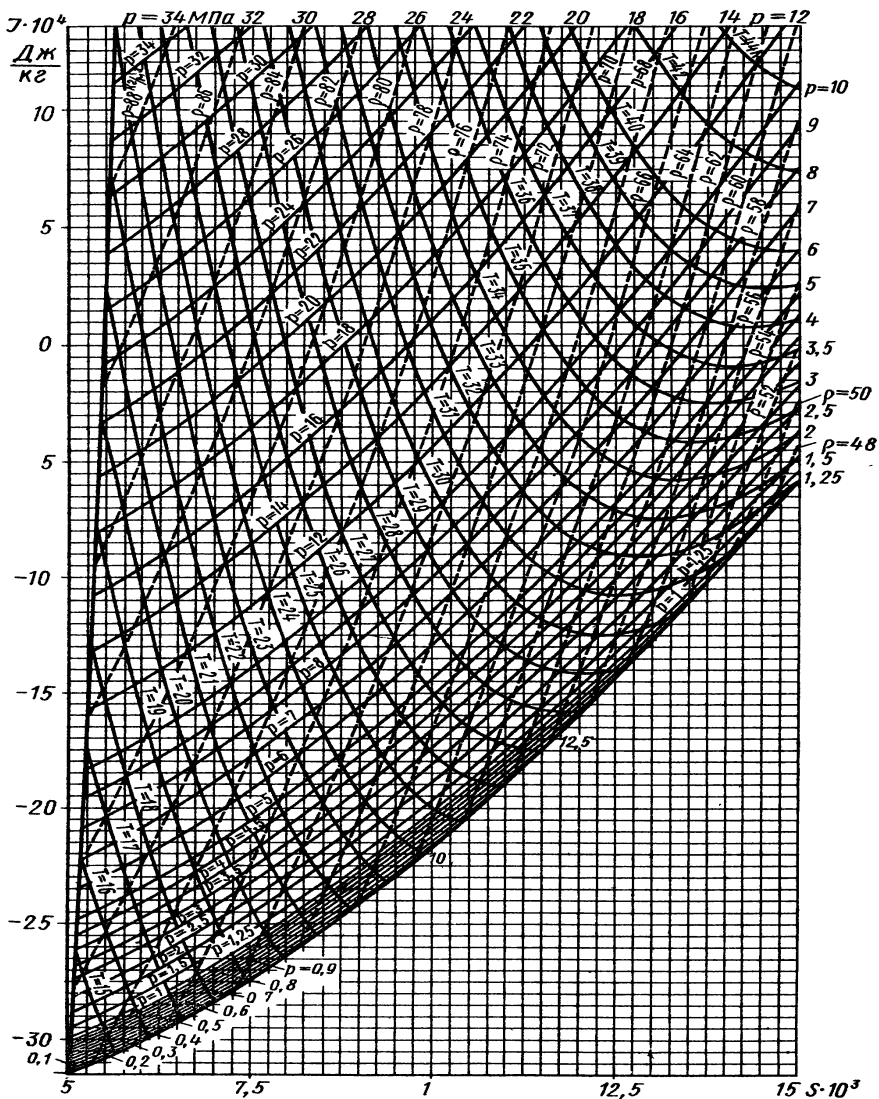


Рисунок 6.2 -  $I$ - $S$ -диаграмма жидкого водорода (параводорода) [ $S$  в  $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ] [8]

## 6.1 Задание зависимостей параметров в виде явных функций

Наиболее простым способом задания свойств является описание их в виде явной функции. Например, для плотности, которая зависит от давления и температуры это может быть двухпараметрическая функция вида:

$$\rho = f(p, T)$$

Описанная таким выражением плотность может быть задана непосредственно в поле для значения плотности (см. рисунок 3.2) путём ввода математического выражения на языке CEL (CFX Expression Language).

Однако выразить явно параметр в виде двухпараметрической функции бывает не так просто, несмотря на то, что отыскание функции тренда является достаточно простой операцией, реализованной, например, в MS Excel. Во-первых, описать сложное поведение изменяющегося параметра простой зависимостью бывает затруднительно во всём диапазоне его изменения. Так, например, на рисунке 6.3 приведены графики зависимостей, аппроксимирующих изменение плотности при изменении давления при постоянном значении температуры в диапазоне давлений от 0 до 15 МПа.

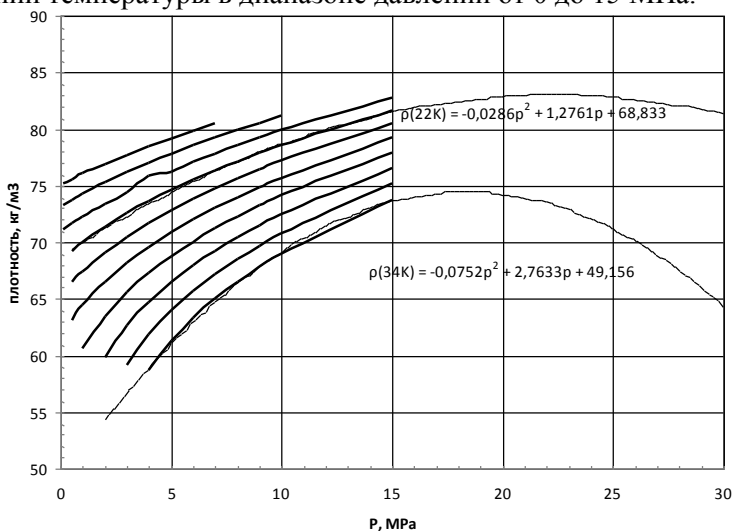


Рисунок 6.3 - Зависимости плотности при изменении давления при постоянном значении температуры

Однако при сравнении рисунков 6.3 и 6.1 хорошо видно, что при выходе за этот диапазон, значения плотности, найденные по указанным зависимостям будут сильно отличаться от реальных. При попытке аппроксимировать весь диапазон сложность функций

существенно возрастает, например:

$$\rho(22\text{K}) = -0,00002p^4 + 0,002p^3 - 0,0653p^2 + 1,4772p + 68,606$$

$$\rho(34\text{K}) = -0,0003p^4 + 0,0188p^3 - 0,5043p^2 + 6,4977p + 38,666$$

Таким образом, для упрощения задачи желательно заранее сузить диапазон изменения параметров до минимального. В выбранном диапазоне от 0 до 15 МПа однопараметрические зависимости имеют вид:

$$\rho(18\text{K}) = -0,0257p^2 + 1,0457p + 73,223$$

$$\rho(22\text{K}) = -0,0286p^2 + 1,2761p + 68,833$$

$$\rho(26\text{K}) = -0,0491p^2 + 1,8172p + 62,772$$

$$\rho(30\text{K}) = -0,0657p^2 + 2,3444p + 56,013$$

$$\rho(34\text{K}) = -0,0752p^2 + 2,7633p + 49,156$$

Нетрудно видеть, что коэффициенты этих однопараметрических зависимостей изменяются монотонно вслед за изменением второго параметра - температуры, причём характер этих зависимостей близок к линейному (рисунок 6.4).

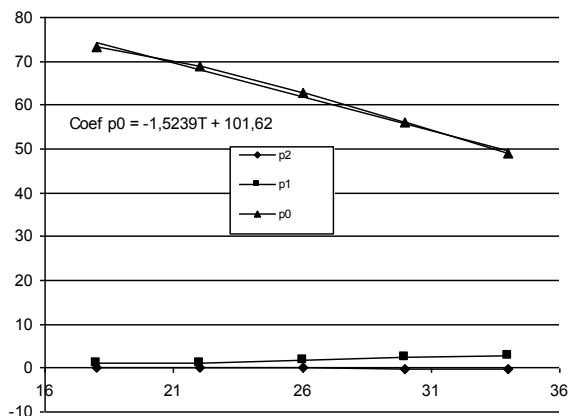


Рисунок 6.4 - Зависимость коэффициентов в однопараметрических уравнениях от температуры

Таким образом, задаваясь выражениями для коэффициентов однопараметрических зависимостей:

$$\text{Coef } p_2 = -0,0034T + 0,0396,$$

$$\text{Coef } p_1 = 0,1126T - 1,0779,$$

$$\text{Coef } p_0 = -1,5239T + 101,62,$$

получаем одно двухпараметрическое уравнение, описывающее изменение плотности при изменении давления от 0 до 15 МПа и температуры от 18 до 34 К:

$$\rho = (-0,0034T + 0,0396)p^2 + (0,1126T - 1,0779)p - 1,5239T + 101,62.$$

Язык CEL имеет строгий синтаксис относительно единиц измерения, и поскольку температура подставляется в это выражение в кельвинах, давление - в мегапаскалях, а результат выражения - плотность в кг/м<sup>3</sup>, CEL-выражение для расчёта плотности примет вид:

$$\text{roH} = ((-0,0034 * T / 1[\text{K}] + 0,0396) * (p / 1[\text{MPa}])^2 + (0,1126 * T / 1[\text{K}] - 1,0779) * (p / 1[\text{MPa}]) - 1,5239 * T / 1[\text{K}] + 101,62) * 1[\text{kg} / \text{m}^3]$$

Выражение для плотности можно ввести непосредственно в поле для задания плотности (рисунок 3.2) или создать наименованное выражение (Expressions -> Add Expression -> roH), а уже затем задать его название в поле Density.

Как было сказано выше, данное выражение справедливо для ограниченного диапазона изменения температуры и давления. Однако, в разделе 5 была описана ситуация, когда в силу расчётных ошибок в расчётной зоне формируются большие забросы параметров, вплоть до отрицательных значений давления. Формальная попытка программы вычислить плотность с использованием такого значения давления приведёт к получению отрицательной плотности и немедленному останову решателя. Поэтому, для стабильности решения желательно использовать функцию, значения которой ограничены заранее заданным физическим диапазоном:

$$\rho = \max(\text{roH}; 60[\text{kg} / \text{m}^3]) - \text{ограничение «снизу»}$$

$$\rho = \min(\text{roH}; 80[\text{kg} / \text{m}^3]) - \text{ограничение «сверху»}$$

$$\rho = \min(\max(\text{roH}; 60[\text{kg} / \text{m}^3]); 80[\text{kg} / \text{m}^3]) - \text{ограничение «снизу» и «сверху»}$$

Это предотвратит от нефизического заброса параметров, поскольку при любых аргументах значение плотности будет находиться строго в диапазоне (60...80) кг/м<sup>3</sup>.



## 6.2 Задание зависимостей параметров в табличном виде

Как было показано в предыдущей главе, описание изменения параметров функцией в явном виде достаточно сложный этап. Причём иногда при резком изменении характера зависимостей параметров подобрать явную зависимость практически невозможно.

Поэтому вторым способом ввода данных в CFX является задание так называемых пользовательских функций (User Function) в табулированном виде. Интерполяция и экстраполяция значений таких функций происходит автоматически.

**Шаг 1.** В меню пре-процессора создаем функцию:  
Simulation→Expressions, Functions and Variables→правый клик по User Functions→Insert→User Function

**Шаг 2.** Вводим имя переменной, например, «Hdensity» для задания переменной плотности (рисунок 6.5).

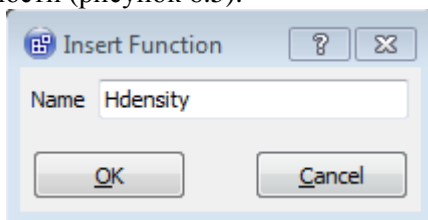


Рисунок 6.5 – Создание пользовательской функции Hdensity

**Шаг 3.** В поле Interpolation Data выбираем опцию Three Dimensional. Для задания таблицы плотности, зависящей от температуры и давления необходима двумерная функция. Однако в программе пользовательские функции бывают только двух видов: одномерные и трёхмерные. Соответственно будет использована трёхмерная функция с игнорируемым третьим измерением.

**Шаг 4.** В поле Argument Units указываем размерности входных параметров в порядке их дальнейшего задания, например «[K], [MPa], [ ]» (У отсутствующего измерения аргумент безразмерный: «[ ]»).

**Шаг 5.** В поле Result Units указываем размерность выходного параметра. Для плотности это «[kg/m^3]».

**Шаг 6.** Для добавления точек используется окно Interpolation Data. Чуть ниже этого окошка есть поля для добавления значений (рисунок 6.6). В поле Coordinate нужно записать значения аргументов в порядке их следования (см. шаг 4), а в Value – соответствующие этому сочетанию аргументов значение функции. Кнопка Add и Remove используется для добавления и удаления данных соответственно. Таким образом, необходимо ввести все значения таблицы.

The image shows a software interface for adding data points. It has a light gray background. At the top, the word "Coordinate" is written in a blue font. Below it are three small white input boxes, each containing the number "0". Below these is a larger white input box labeled "Value" in blue. At the bottom, there are two buttons: "Add" and "Remove", both with a gradient and rounded corners.

Рисунок 6.6 – Поле для ввода табличных значений

**Шаг 7.** Для автоматизации процесса ввода можно производить импорт из файла. Для этого нужно подготовить текстовый файл (\*.txt или \*.dat), содержащий данные в формате

<аргумент1>, <аргумент2>, <аргумент3>, <функция>  
<аргумент1>, <аргумент2>, <аргумент3>, <функция>

...

например:

20, 5.066, 0, 75.888

20, 7,509, 0, 77,98

22, 5.066, 0, 74,55

...

Создать такой файл можно, используя MS Excel.

**Шаг 8.** В пре-процессоре в свойствах User Function в поле Interpolation Data щелкаем правой кнопкой мыши и выбираем «Import Data...» (рисунок 6.7). Указываем нужный файл и производим импорт.

**Шаг 9.** Далее функцию можно вызывать из любого CEL-выражения, например:  $\rho_H = \rho_{\text{density}}(T, P, 0)$ . Также рекомендует выполнять ограничение значений функции сверху и снизу во избежание забросов значений при дальнейшей экстраполяции.

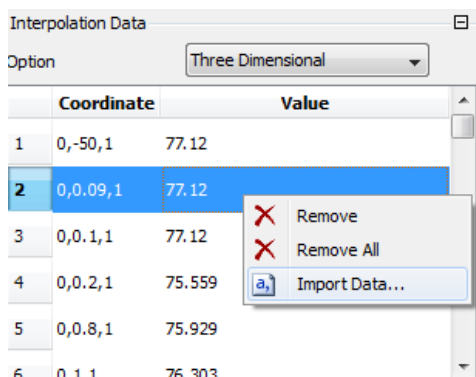


Рисунок 6.7 – Импорт табличных данных из файла

### 6.3 Рекомендации по решению задач с зависимостью параметров

Задачи с зависимостью параметров являются намного менее стабильным, по сравнению с задачами, рабочее тело которых имеет постоянные параметры. Это связано как с объективными причинами (возрастающей физико-математической сложностью таких задач), так и с субъективными причинами, поскольку в таких задачах увеличивается количество мест, в которых расчётчик может допустить ошибку при постановке задачи.

Для уменьшения вероятности ошибок при постановке сложных задач рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. Увеличивать сложность задачи постепенно. Так, например, если требуется посчитать задачу с переменной плотностью, зависящей от давления и температуры, то рациональнее выполнять решение в несколько этапов. Сначала посчитать задачу с постоянной плотностью без учёта изменения температуры, затем посчитать аналогичную задачу с учётом температуры, затем - с зависимостью плотности только от давления и наконец - с зависимостью плотности от давления и температуры. Поэтапное движение позволяет локализовать возможную область возникновения ошибки и общее время решения задачи оказывается ниже, чем при попытке решения «сходу».

2. При задании зависимостей параметров крайне желательно проверять эти зависимости, например, табулируя функции в Ms Excel

или непосредственно в CFX-Pre на вкладке Expressions. Подобные действия позволяют выявить и устранить ошибки ввода сложных выражений, а также проверить, правильно ли программа экстраполирует табличные функции. В случае неверной экстраполяции в таблицу параметров можно добавить фиктивные значения на границе диапазона данных, чтобы предотвратить ложную экстраполяцию. Например, можно продублировать граничные значения для резко удалённых значений, например -50 МПа (рисунок 6.8). Это даёт гарантию, что при любых флуктуациях давления (даже при отрицательных забросах) значение плотности будет оставаться неотрицательным (рисунок 6.9).

T, K	P, МПа						
	-50	0,09	0,1	0,2	0,8	1	1,6
0	77,12	77,12	77,12	75,559	75,929	76,303	76,826
14	77,12	77,12	77,12				
16	75,475	75,475	75,475	75,559	75,929	76,303	76,826
18	73,628	73,628	73,628	73,735	74,169	74,581	75,165
20	71,512	71,512	71,512	71,639	72,152	72,62	73,306
22	1,192	1,192	1,192	69,228	69,779	70,413	71,209
24	1,075	1,075	1,075	2,318	67,153	67,876	68,85
26	0,9794	0,9794	0,9794	2,077	63,916	64,883	66,139
28	0,9021	0,9021	0,9021	1,888	59,749	61,2	62,939
30	0,8361	0,8361	0,8361	1,735	6,384	56,138	58,962
32	0,7789	0,7789	0,7789	1,607	5,628	12,584	53,444

Рисунок 6.8 – Задание фиктивных значений для коррекции экстраполяции

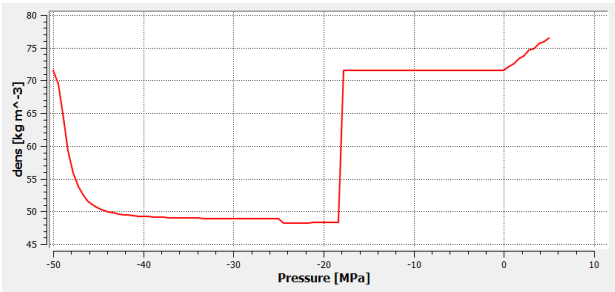


Рисунок 6.9 – Результат экстраполяции таблицы плотности при отрицательных забросах давления (при постоянной температуре 20K)

3. И наконец, при старте усложненной задачи желательно инициализироваться с результатов предыдущей, поскольку старт «с нуля» (с поля параметров, полученного стандартной инициализацией) крайне затруднителен и даже верно поставленная задача может «разваливаться», вводя в заблуждение.

## Библиографический список

1. Иванов, В.К. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш [Текст]/ В.К. Иванов, А.М. Кашкаров, Е.Н. Ромасенко, Л.А. Толстиков// Конверсия в машиностроении. - 2006. - № 1. - С. 15-21.
2. CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS/CFX: метод. указания/ сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. - 47 с.: ил.
3. CFD-моделирование шнекоцентробежных насосов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS/CFX: метод. указания/ сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий - Электрон.текстовые и граф. дан. (2 Мбайт). - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. - 57 с.: ил.
4. CFD-моделирование предкамерных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS/CFX: метод. указания /сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, Е.А. Никонова, А.В. Кузнецов - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. - 79 с.: ил.
5. Матвеев, В.Н. Проектный расчет шнекоцентробежного насоса: Учебное пособие / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 64 с.: ил.
6. Исследование рабочего процесса в ступени осевой турбины с помощью универсального программного комплекса Ansys/CFX: метод.указания /сост. О.В. Батулин, Д.А. Колмакова, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов, Л.С. Шаблий– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 100 с.: ил.
7. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов вузов [Текст]/ В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин; под редакцией В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.: ил.
8. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / Под ред. В.М. Кудрявцева. В 2-х кн. Кн. 2. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1993. – 368 с.: ил.
9. Зрелов, В.Н. Жидкие ракетные топлива [Текст]/ В.Н. Зрелов В.Н., Е.П. Серегин. – М.: Химия, 1975. – 319 с.: ил.
10. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей [Текст]/ М.С. Штехер. - М.: Машиностроение, 1976.– 301 с.
11. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. [Текст]/Д. Ю. Гамбург,

В. П. Семенов, Н. Ф. Дубовкин, Л. Н. Смирнова; Под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1989. — 672 с.: ил.

12. Егорычев, В.С. Топлива химических ракетных двигателей: учебное пособие [Текст]/ В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев.— Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.— 72 с. : ил.

13. Овсянников, Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст]/ Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский Б.И. — М.: Машиностроение, 1971. — 539 с.: ил.

14. Овсянников, Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст]/ Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский Б.И. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. — 376 с.: ил.

15. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн.: учебник для авиац. спец. вузов [Текст]/ А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. Под ред. В.М. Кудрявцева. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк, 1993.

16. Овсянников, Б.В. Расчет и проектирование шнекоцентробежного насоса: учебное пособие [Текст]/ Б.В. Овсянников, В.С. Селифонов, В.В. Черваков - Изд-во МАИ, 1996. - 72 с.: ил.

17. Иванов, А.В. Расчет и профилирование шнекоцентробежного насоса турбонасосного агрегата ЖРД: учебное пособие [Текст]/ А.В. Иванов. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 120 с.